



DESARROLLO DE UN MODELO EN 3D DE CORTE DE METALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO DE INGENIERIA MECÁNICA
2017/2018

Autor: David Martín Martín

Tutor: Xavier Soldani

Departamento de Ingeniería Mecánica

Índice

1. Índice de figuras	5
2. Índice de gráficas.....	6
3. Introducción	8
4. Objetivo	10
4.1 Proceso de acabado	10
5. Proceso de mecanizado.....	11
5.1 Tipos de mecanizado.....	12
5.1.1 Fresado	12
5.1.2 Taladrado.....	13
5.1.3 Torneado	13
6. Formacion de viruta	16
6.1 Clase de viruta	17
6.1.1 Viruta discontinua	17
6.1.2 Viruta continua.....	18
6.2 Parámetros corte utilizados en el proyecto	19
6.2.1 Avance	19
6.2.2 Profundidad de corte	19
7. Simulación 2D frente a 3D.....	19
7.1 Corte ortogonal:	19
7.2 Corte oblicuo:.....	20
7.3 Limitaciones.....	21
8. Método de Elementos Finitos	21
8.1 Pasos seguidos para realizar el proyecto	22
8.1.1 Sobre el método y los tiempos de cálculo	23
9. Modelo	25
9.1 Geometría del modelo	25
10. Material.....	26
10.1 Propiedades.....	27
10.1.1 <i>Propiedades mecánicas</i>	28
10.1.2 <i>Propiedades térmicas</i>	28
10.2 Ley constitutiva de Johnson-Cook.....	28
10.3 Criterio de eliminación de material.....	30
11. Descripción de las simulaciones.....	31

11.1	Archivo .CAE	31
11.2	Archivo .INP	31
11.3	Influencia del mallado en los resultados.....	32
12.	Resultados	33
12.1	Evolución de las fuerzas en función del tiempo.....	33
	35
12.2	Relación entre las fuerzas y el mallado	35
12.2.1	Tiempo de cálculo en función del mallado	37
12.3	Estudio del efecto de la velocidad sobre las fuerzas de corte	38
12.4	Estudio del efecto del coeficiente de rozamiento sobre las fuerzas de corte.	40
12.5	Estudio del efecto del mallado sobre la morfología de la viruta	41
12.5.1	Mass Scaling	43
13.	Estudio de variables locales en función de la velocidad	45
14.	Discusión sobre los resultados obtenidos.....	46
15.	Entorno socioeconómico.....	48
15.1	Presupuesto	49
16.	Equipo utilizado para realizar el proyecto	50
	Bibliografía	54

1. Índice de figuras

Figura 5.1: Filo geoméricamente determinado.	11
Figura 5.2: Filo no determinado geoméricamente [5].....	12
Figura 5.3: Ejemplos de utensilios con filos no determinados geoméricamente [6]	12
Figura 5.4: Proceso de fresado [7]	13
Figura 5.5: Esquema de taladrado a) [8] y ejemplo industrial del proceso de taladrado b) [9] .	13
Figura 5.6: Esquema del proceso de torneado [10]	14
Figura 5.7: Esquema del movimiento de avance en procesos de fresado [11]	14
Figura 5.8: Esquema del movimiento de avance en procesos de torneado [12].....	15
Figura 5.9: Esquema de los movimientos básicos del proceso de torneado, donde también puede verse el movimiento de penetración [13].....	15
Figura 5.10: Ejemplo de proceso de acabado para fines estéticos a) [14] y ejemplo de proceso de acabado para ajustar la pieza a las dimensiones y las características superficiales necesarias b) [15]	16
Figura 6.1: Mecanismo de arranque de viruta a) y ejemplo de arranque de viruta durante el proceso de fresado b) [17]	18
Figura 6.2: Ejemplo de viruta continua a) [18] y mecanismo de arranque de viruta para viruta continua b)	19
Figura 7.1: Esquema de corte ortogonal en 2D a) [20] y esquema de corte ortogonal en 3D b) [21]	20
Figura 7.2: Esquema de corte oblicuo en 3D, representando los ángulos que intervienen en el proceso.....	20
Figura 8.1: Esquema de las condiciones de contorno del ensayo.....	22
Figura 8.2: Modelos de la herramienta a) y de pieza y herramienta b).....	23
Figura 9.1: Esquema de las partes de la pieza (Chip, Layer y Base)	25
Figura 9.2: Modelo desarrollado para el ensayo: herramienta a), pieza a mecanizar b) y disposición de pieza y herramienta durante la simulación c).....	26
Figura 10.1: Esquema de las capas que componen la pieza. (Layer, Chip y Base).....	30
Figura 11.1: Impresión de resultados en el archivo .inp	32
Figura 11.2: Mallados escogidos para este proyecto (en micras): a)50, b)40, c)30, d)20, e)10	33
Figura 12.1: Fuerza de corte media que aparece en los ensayos.	34
Figura 9.2: Fuerza axial media que aparece en los ensayos	34
Figura 12.3: Fuerza axial media que aparece en los ensayos	35
Figura 12.4: Gráficas que muestran la variación de las fuerzas entre un mallado y otro. a) Todas las fuerzas en función del mallado, b) F_c en función del mallado, c) F_a en función del mallado y d) F_r en función del mallado.	37
Figura 12.5: Gráficas que muestras la variación de: a) F_c con el coef. De rozamiento, b) F_a con el coef. De rozamiento y c) F_r con el coef. De rozamiento.	41
Figura 12.6: Morfología de la viruta en función del mallado (en micras): a)50, b)40, c)30, d)20 y e)10	42
Figura 13.1: Tensión plástica equivalente que aparece en el mallado de 10 micras a distintas velocidades (en m/s): a)3.33 y b)10	45

2. Índice de gráficas

Gráfica 12.1: Comparación del tiempo de cálculo en función del mallado a una velocidad de 5 m/s.	38
Gráfica 12.2: Representación de los valores de la tabla 9.1	39
Gráfica 12.3: Comparación de fuerzas con una malla de 10 micras en función de la velocidad con coeficiente de rozamiento de 0.8.....	40
Gráfica 12.4: Comparación de las fuerzas medias con y sin el uso del Mass Scaling a una velocidad de 5m/s y un mallado de 10 micrómetros.....	44
Gráfica 12.5: Comparación del tiempo de cálculo en función del uso del Mass Scaling	44

El inconel 718 [1] es una de las aleaciones de base níquel más relevantes. Posee grandes ventajas en cuanto a comportamiento en servicio se refiere, así como inmejorables propiedades térmicas. Esta aleación es usualmente usada en la industria aeroespacial en elementos como álabes o incluso en centrales de generación de energía.

El presente proyecto trata sobre el uso de programas de simulación en 3D para el estudio de las fuerzas que están implicadas en los procesos de mecanizado de esta aleación, más concretamente durante el proceso de acabado. Dicha empresa se llevará a cabo mediante la simulación en 3D del corte de una pieza de Inconel 718. Gracias al programa Abaqus se podrán obtener resultados matemáticos precisos sobre cómo actuará la herramienta y cuáles serán las fuerzas que aparecerán.

Para realizar dicho ensayo se utilizará un modelo de elementos finitos, el cual hay que modelizar previamente, representando el proceso de corte con alta fidelidad. Se han realizado varias simulaciones con el fin de definir de la forma más precisa los parámetros óptimos de mecanizado, para así poder maximizar la eficiencia del proceso y reducir los factores que puedan producir daños tanto en la pieza como en la herramienta.

Usando estas técnicas para comprobar la viabilidad de fabricar una determinada pieza se consigue un ahorro en costes considerable, ya que disminuyen los ensayos experimentales y con ello los gastos de materiales y herramientas para realizar este tipo de ensayos.

3. Introducción

El modelado en tres dimensiones o 3D es una representación matemática de cualquier objeto tridimensional a través de un software creado para ese fin. La imagen que se reproduce puede verse como una imagen en dos dimensiones mediante el renderizado 3D, pero en este caso se utilizara una simulación de fenómenos físicos por ordenador.

Bien es sabido que hasta hace relativamente poco el uso de programas de simulación en 3D era muy limitado, debido a la potencia de cálculo que se necesitaba para realizar algunos procesos y al precio que había que pagar por tener dicha tecnología. En el inicio de la era informática y de los gráficos en tres dimensiones todo era mucho más lento que hoy en día, por tanto, si se disponía del dinero para adquirir estos superordenadores, en muchas ocasiones, no se disponía del tiempo necesario para que los cálculos finalizasen o incluso, de un espacio para situar dicha máquina.

Con el paso del tiempo y la mejora continua e inexorable de la tecnología se iban consiguiendo modelos que cada vez ocupaban menos espacio pero que tenían más potencia. Con la popularización de los ordenadores los precios disminuyeron y se hizo más fácil para cualquiera, particular o empresa, adquirir los medios para realizar simulaciones de procesos antes de gastar material en ensayos experimentales. Así mismo, han ido surgiendo nuevas tecnologías que han ayudado aún más a los procesadores tradicionales a acelerar los tiempos de cálculo.

No obstante, la tecnología más potente sigue siendo la más cara, pero esta inversión a medio y largo plazo es mucho más viable que tener que dedicar fondos todos los meses para renovar las herramientas, las cuales son bastantes caras, y las piezas con las que se va a ensayar.

Para realizar operaciones de acabado, corte, desbaste... en superaleaciones, en este caso Inconel 718, se utilizan herramientas cerámicas o, para el caso del acabado, herramientas fabricadas con metales duros con geometrías positivas y cantos afilados muy vivos [2]. Si deseamos mayores velocidades de corte deberemos usar carburos metálicos en las herramientas, nitruro de boro cubico cristalino (herramientas PCBN, *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*).

La temperatura es un factor muy importante a tener en cuenta, ya que este tipo de aleaciones presentan una gran estabilidad térmica y resistencia a valores elevados de la misma, pero también es un mal conductor térmico. Esta es una de las razones más importantes tanto del

desgaste de la herramienta como de los posibles daños que puedan producirse en la superficie de la pieza que se desea moldear. Se necesitan materiales resistentes a altas temperaturas, que no pierdan sus propiedades de corte, para trabajar con esta materia prima.

Para reducir este exceso de calor se consume una gran cantidad de fluido refrigerante y aun esta fuera de nuestro alcance eliminarlo mediante el uso de mecanizado en seco, ya que los materiales son difíciles de conseguir y costosos y seguimos teniendo el problema de la excesiva temperatura alcanzada en la zona de corte.

Por todos estos problemas y el desperdicio de capital que suponen cada día se ven más programas nuevos de modelado en 3D y más empresas que los utilizan, sin contar el uso particular.

Pero el problema de esta novedosa tecnología aplicada a este tipo de trabajos es que aún no existen los modelos suficientes como para determinar velocidades de corte, materiales a usar, etc, de todos los metales de se trabajan hoy en día. La simulación en 3D es una herramienta muy potente que día a día cobra más fuerza, debido a que su adquisición ya es relativamente barata y al ahorro que supone. Los modelos realizados con estos programas son fieles con la realidad y llegan a simular perfectamente el proceso, en este caso de corte para realizar un acabado, con total precisión y detalle. Esto elimina la necesidad de realizar cientos de ensayos experimentales, lo cual constituye una fuente de perdidas tanto económicas como de tiempo, y permite la apertura a nuevos campos como la impresión en 3D. Cuantos más usuarios realicen sus proyectos con este tipo de herramientas más modelos habrá guardados en bases de datos y más fácil será acceder a ellos. Poder localizar los valores óptimos para cortar el Inconel 718 o cualquier otro tipo de material estará a un solo click en el buscador, haciendo posible que el tiempo y el material perdidos sean mínimos y pudiendo siempre contribuir con datos experimentales obtenidos en los ensayos propios.

4. Objetivo

El objetivo de este proyecto es utilizar un modelo numérico de mecanizado por arranque de viruta del Inconel 718. El propósito es lograr conocer mejor como se desarrolla el proceso de acabado para así ayudar a definir correctamente unos límites para los parámetros de corte de este material.

El trabajo está basado en simulaciones de elementos finitos (MEF) para finalmente llegar a conclusiones útiles enfocadas al ámbito experimental.

Partiendo de un modelo inicial se han ido variando diferentes parámetros geométricos (profundidad del corte) y numéricos (tamaño de malla, coeficiente de fricción, velocidad de corte) del proceso de acabado, en este caso mediante torneado, y del material para obtener resultados del proceso final.

Las magnitudes que se tienen en cuenta en este proyecto son la velocidad de corte, las fuerzas que aparecen durante el proceso, la morfología de la viruta, la temperatura y los niveles de deformaciones inducidos por el proceso.

Todos estos cálculos serán realizados con la herramienta/programa Abaqus/*Explicit* mediante el análisis de un modelo 3D. Los resultados que se consigan serán estudiados para poder establecer unos límites adecuados para los parámetros que intervienen en el proceso.

Cabe destacar que el proyecto estará caracterizado por el comportamiento del material atendiendo a la ley constitutiva de Johnson-Cook, implementada mediante una expresión en Abaqus. Esta ley relaciona parámetros como la temperatura, el factor de endurecimiento por deformación y la sensibilidad del material frente a la velocidad de deformación.

4.1 Proceso de acabado

El proceso a estudiar mediante las simulaciones será el de acabado en torno. Este proceso forma parte de las últimas etapas de fabricación [3]. Es utilizado para dar un mejor aspecto superficial, pero no se limita solo a esta función: se usa también para conferir ciertas propiedades superficiales en función del trabajo que vaya a desempeñar y también para conseguir las dimensiones deseadas, quitando finas capas de material para adaptarlo a las tolerancias estipuladas.

5. Proceso de mecanizado

El proceso de mecanizado [4] es un proceso de fabricación que se compone de un conjunto de operaciones para la transformación y conformación de piezas mediante eliminación del material. Se realiza a partir de productos semielaborados, como lingotes o tochos, u otro tipo de piezas provenientes todas de procesos como el moldeo o la forja. Estas piezas mecanizadas pueden ser productos finales, no necesitando ninguna acción más sobre ellos, o pueden requerir tratamientos posteriores antes de su consumo, pero finalmente siempre sirven para satisfacer las necesidades de los clientes.

Dentro de las posibles categorías de clasificación de un proceso de fabricación una de las más importantes es la que define el proceso según las características del mismo. Puede clasificarse en:

- Conformado por eliminación de material.
- Conformado por adhesión de material.
- Conformado por deformación plástica.

El proceso de mecanizado estaría catalogado dentro del primer grupo. Este método tiene multitud de posibilidades, entre las que destacan el torneado, el fresado y el taladrado.

Si hablamos del tipo de herramientas que se utilizan en estas máquinas para llevar a cabo la tarea podemos distinguir dos tipos de herramientas en función de la forma de su filo [4]:

- Filo geoméricamente determinado: como son las herramientas que se usan en tornos o fresadoras. Este tipo de filo puede verse en el esquema de la Figura 5.1:



Figura 5.1: Filo geoméricamente determinado.

- Filos no determinados geoméricamente: granos abrasivos cuyas formas no son regulares. Pueden verse dos ejemplos, uno en la Figura 5.2 y otro en la Figura 5.3:

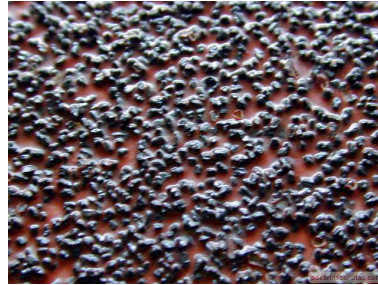


Figura 5.2: Filo no determinado geoméricamente [5]



Figura 5.3: Ejemplos de utensilios con filos no determinados geoméricamente [6]

5.1 Tipos de mecanizado

En este proyecto se trabajó con un modelo preparado para máquina-herramienta, torneado [4] más concretamente. Dicho esto, dependiendo del movimiento relativo entre ambas nos encontramos con:

- 5.1.1 **Fresado:** se usa una herramienta que gira sobre su eje y que se constituye de varios filos para arrancar el material (fresa). Para realizar la operación es necesario que se produzcan movimientos relativos entre la pieza y la herramienta, así como variaciones en la velocidad de giro o desplazamientos por parte del material. También cabe la posibilidad de que únicamente se mueva la fresa y el material permanezca en el mismo punto de sujeción. En la Figura 5.4 puede verse un ejemplo de fresado.



Figura 5.4: Proceso de fresado [7]

5.1.2 **Taladrado:** es un proceso muy parecido al de fresado pero esta técnica solo se utiliza para hacer agujeros en el material mediante una herramienta que gira y avanza en la dirección que se desea perforar. Esta herramienta se denomina broca y tiene varios filos con una especie de ranura para evacuar la viruta y con ella parte del calor de una manera efectiva. En la Figura 5.5 se ven ejemplos de taladrado:

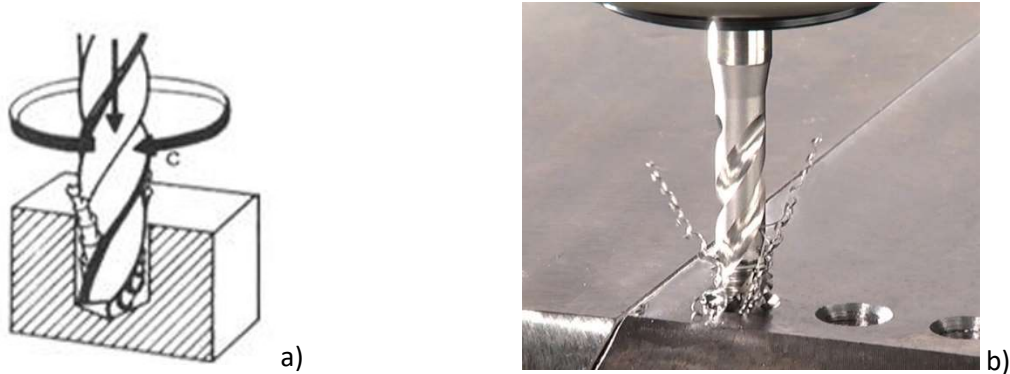


Figura 5.5: Esquema de taladrado a) [8] y ejemplo industrial del proceso de taladrado b) [9]

5.1.3 **Torneado:** se realiza la geometría deseada gracias a la combinación de un movimiento de rotación por parte de la pieza y un movimiento de avance por parte de la herramienta, esta con un solo filo. Es una técnica muy eficiente para piezas de revolución con simetría axial, aunque también puede utilizarse para piezas excéntricas (cigüeñales). El estudio en cuestión se realiza sobre la operación de acabado en torno. La Figura 5.6 muestra un esquema del proceso de torneado:

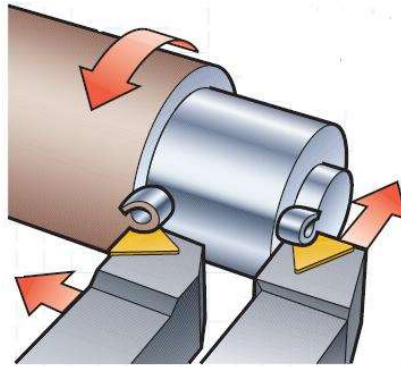


Figura 5.6: Esquema del proceso de torneado [10]

En procesos de arranque de material y formación de viruta es imperativo que se generen movimientos relativos entre la pieza y la herramienta, de tal forma que entre ellas se puedan producir las interacciones necesarias para trabajar el material. En base a esto se puede distinguir:

- Pieza quieta y movimiento de la herramienta.
- Herramienta quieta y movimiento de la pieza.
- Movimiento de ambas, siendo este nuestro caso. Tenemos un movimiento de giro por parte de la pieza y un movimiento de avance por parte de la herramienta.

Si precisamos aún más, los movimientos que pueden intervenir en función de la operación que se esté realizando pueden ser:

1. Movimiento de corte: aquel movimiento que, sin un movimiento de avance, solo arranca material durante una revolución del mismo, en el caso del torneado o el fresado, o durante una carrera, para operaciones con movimiento rectilíneo.
2. Movimiento de avance: Es el que hace que la herramienta se mueva desde la posición inicial hasta la posición que se requiera. Si se combina con el de corte hace posible el arranque de viruta. Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran esquemas de este movimiento:

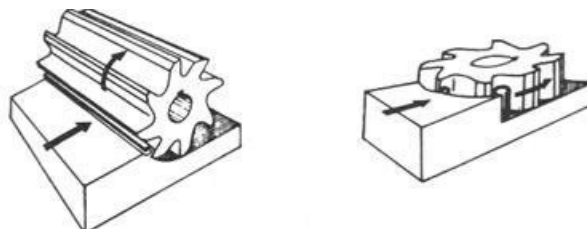


Figura 5.7: Esquema del movimiento de avance en procesos de fresado [11]

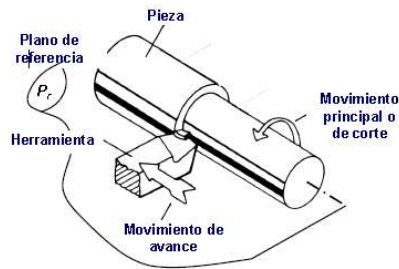


Figura 5.8: Esquema del movimiento de avance en procesos de torneado [12]

3. Movimiento de penetración: determina la profundidad del corte y, en consecuencia, el espesor de la viruta que se arranca. En la Figura 5.9 puede observarse el movimiento descrito:

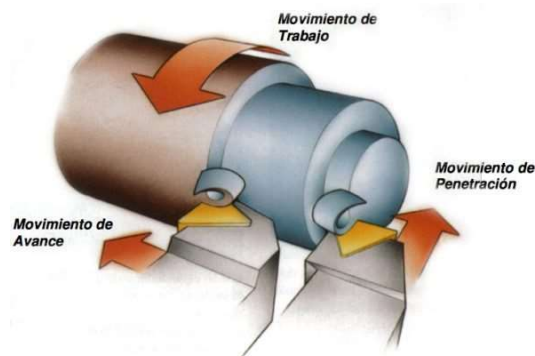


Figura 5.9: Esquema de los movimientos básicos del proceso de torneado, donde también puede verse el movimiento de penetración [13]

4. Movimiento de aproximación: no es un movimiento de mecanizado propiamente dicho ya que no se produce si quiera contacto con el material. Es una combinación de movimientos que sitúan la herramienta en el punto exacto para después proceder a realizar la operación.

Acabado

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso simulado será un acabado, técnica que pertenece a esta última forma de mecanizar.

Por otra parte, tenemos que este tipo de acabados pueden ser o bien para dar un mejor aspecto a las piezas finales o bien para otorgar ciertas características dimensionales o superficiales, todo ello en función del uso que se le vaya a dar al producto.

En la Figura 5.10 a) puede verse el cambio que se produce al mecanizar una pieza mediante esta operación para mejorar su aspecto externo. En este tipo de piezas no se busca ningún requerimiento especial, es solamente para hacerlo más atractivo a la vista.

Si nos fijamos en la Figura 5.10 b), lo que quiere lograrse con este proceso es mejorar las propiedades superficiales en cuanto a desgaste y fricción y, además, se buscan unas dimensiones adecuadas al espacio de trabajo, como puede observarse en las zonas achaflanadas de la pieza, por ejemplo.

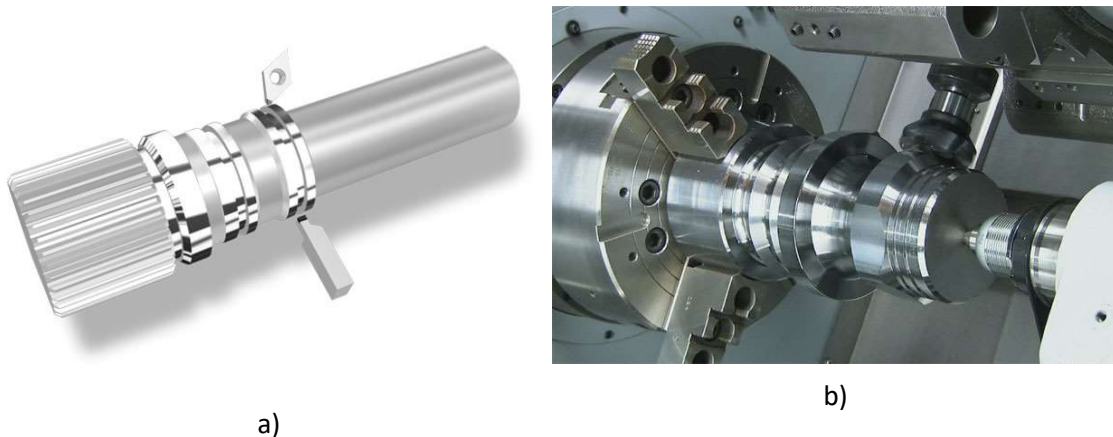


Figura 5.10: Ejemplo de proceso de acabado para fines estéticos a) [14] y ejemplo de proceso de acabado para ajustar la pieza a las dimensiones y las características superficiales necesarias b) [15]

Tanto en una operación como en la otra lo que se persigue es eliminar las rugosidades superficiales al máximo posible, ya que estas contribuyen a la creación de tensiones, desgaste y fricción, y todo a lo que estos agentes conllevan, si nos fijamos en las consecuencias ingenieriles, y también es esta rugosidad superficial la que confiere un aspecto más feo a la pieza final.

6. Formacion de viruta

Como este estudio se centra en el torneado, a partir de este punto se hablará casi exclusivamente de este tipo de mecanizado. Este proceso ha evolucionado mucho, ahora no solo se busca arrancar material, sino que, además, se busca una manera eficiente de gestionar dicho material controlando de manera precisa todos los parámetros que forman parte de esta acción para conseguir resultados de calidad y precisión.

Hay que controlar la formación de viruta al milímetro para que tenga una forma y tamaño que permitan ejecutar la tarea sin interrupciones ni daños para la pieza. Para este fin, es muy importante tener controlados el avance y la profundidad, ya que son dos de los factores más importantes a tener en cuenta en la formación de viruta. Si no se puede gestionar eficazmente esta viruta hay que recurrir a herramientas que cuenten con un buen rompe virutas para conseguir los mejores resultados.

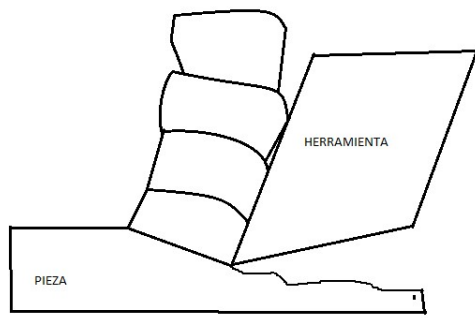
6.1 Clase de viruta

Al trabajar con metales, si se desea eliminar material del tocho principal, se producirán unos restos denominados virutas [16]. Estas virutas se separan del material normalmente a alta temperatura y pueden hacer que el proceso se ralentice o se lleve a cabo de manera errónea. Hay distintos tipos que se ven a continuación.

6.1.1 Viruta discontinua

Se presenta al maquinar elementos frágiles. También pueden aparecer en materiales dúctiles si las condiciones de corte no son las idóneas. Cuando se corta un material la herramienta comprime a la pieza, entonces la viruta comienza a desplazarse sobre la intercara viruta-herramienta hasta que se produce su rotura. Posteriormente esta se separa del resto del material. En la Figura 6.1 pueden verse ejemplos de este tipo de viruta. La aparición de la misma se ve favorecida por:

- ❖ *Materiales frágiles.*
- ❖ *Angulo de desprendimiento pequeño*
- ❖ *Avance grueso*
- ❖ *Baja velocidad de corte*
- ❖ *Vibración excesiva*



a)



b)

Figura 6.1: Mecanismo de arranque de viruta a) y ejemplo de arranque de viruta durante el proceso de fresado b) [17]

6.1.2 Viruta continua

No presenta fracturas, al mecanizar aparece una viruta en forma de tira continua. Este tipo de resto hace posible un mejor acabado superficial. Las herramientas de carburo cementado y aceros rápidos (HSS o *High Speed Steel*) tienden a generar viruta continua. Un factor que se modifica es el ángulo de desprendimiento y también se utilizan fluidos de corte, haciendo que sea más fácil la aparición de viruta continua. Favorecen este proceso:

- ❖ *Materiales dúctiles*
- ❖ *Avances finos*
- ❖ *Bordes afilados*
- ❖ *Gran ángulo de ataque*
- ❖ *Alta velocidad de corte*
- ❖ *Uso de fluidos de corte para enfriar tanto herramienta como pieza*
- ❖ *Mínima resistencia al flujo de viruta:*
 - Pulido en la cara de ataque
 - Líquidos de corte
 - Herramientas con bajo coeficiente de fricción
 - Materiales de maquinado libre (con elementos como plomo, fosforo o azufre)

Las Figura 6.2 muestra ejemplos de viruta continua:

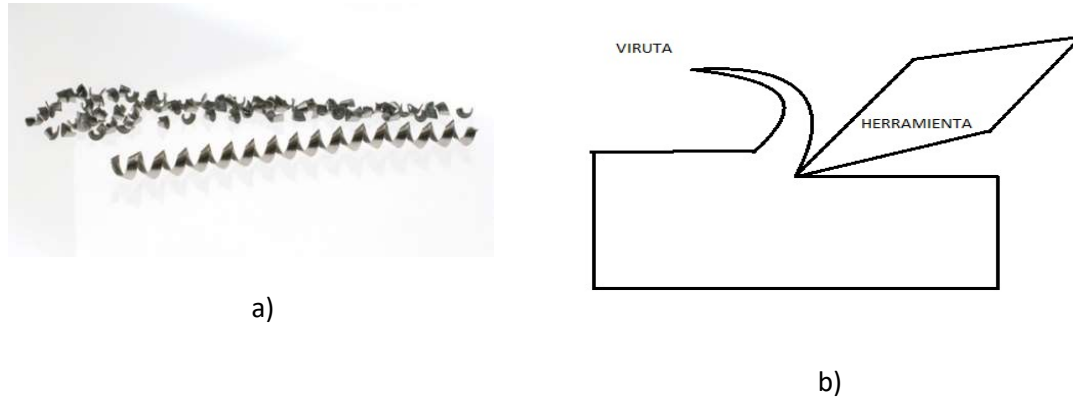


Figura 6.2: Ejemplo de viruta continua a) [18] y mecanismo de arranque de viruta para viruta continua b)

6.2 Parámetros corte utilizados en el proyecto

6.2.1 **Avance:** desplazamiento relativo entre herramienta y pieza en cada revolución. Si se conocen la velocidad de giro [rpm] y el avance [mm] se puede obtener la velocidad de avance [mm/m][4].

$$\text{Velocidad de avance (Va)} = \text{avance (a)} \times \text{velocidad de giro (n)}$$

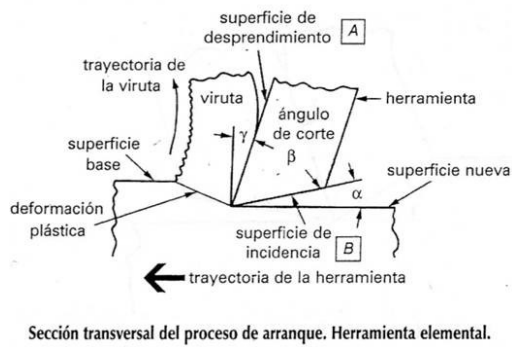
6.2.2 **Profundidad de corte:** o profundidad de pasada, es el espesor que penetra la herramienta para arrancar viruta en una carrera o revolución. Si se conocen la profundidad de pasada [mm] y el avance [mm] puede obtenerse la sección media de viruta [mm²][4].

$$\text{Sección media de viruta (S)} = \text{avance (a)} \times \text{profundidad de pasada (p)}$$

7. Simulación 2D frente a 3D

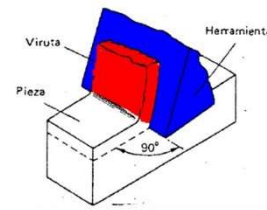
En este proyecto se está trabajando con una herramienta cuya posición no es apta para realizar un corte ortogonal, sino uno oblicuo [19].

7.1 **Corte ortogonal:** el filo de la herramienta es perpendicular al movimiento de la misma y la viruta se evacua a lo largo de la cara de la herramienta. Este tipo de corte es el único apto para simulaciones en 2D. En la Figura 7.1 se observan dos esquemas de este tipo de corte, uno en 2D y otro en 3D.



a)

CORTE ORTOGONAL



b)

Figura 7.1: Esquema de corte ortogonal en 2D a) [20] y esquema de corte ortogonal en 3D b) [21]

7.2 Corte oblicuo: el filo forma un ángulo de inclinación con respecto a su movimiento. La viruta se desplaza hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta. Por último, el ángulo de desprendimiento es una propiedad geométrica básica de cada herramienta, y es el que forman la normal a la superficie de la pieza y la recta de constituye la cara de la herramienta. En la Figura 7.2 pueden verse estos tres ángulos:

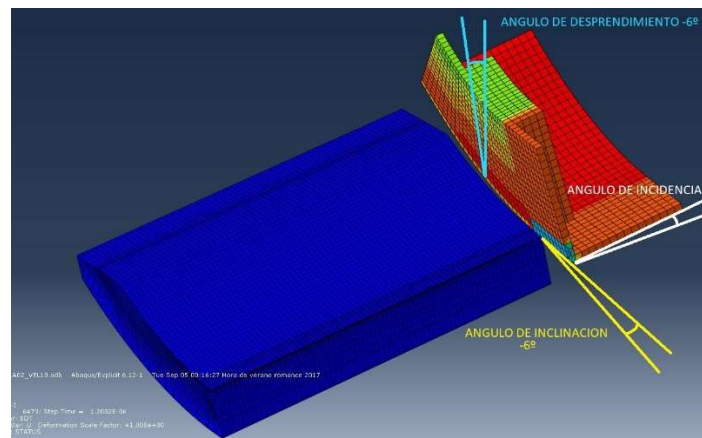


Figura 7.2: Esquema de corte oblicuo en 3D, representando los ángulos que intervienen en el proceso

Si aumenta el ángulo de inclinación también lo hace el ángulo de desprendimiento, dando lugar a una viruta más delgada y alargada. Los ángulos, tanto de inclinación como de desprendimiento, tienen un valor de -6° .

7.3 Limitaciones

Ambos métodos tienen sus ventajas y sus desventajas, pero lo más destacable sería:

- En el caso de las simulaciones 2D, sus limitaciones son variadas, pero la más importante es que, y en relación a nuestro estudio, solo podrían evaluarse situaciones de corte ortogonal, lo cual nos puede dar una idea del proceso, pero, a la hora de llevar a cabo la fabricación, esta se realiza siempre en 3 dimensiones, por lo que este tipo de simulaciones impide ver lo que pasa en una tercera dimensión.
- Las simulaciones 3D no tienen casi ningún tipo de limitación en cuanto a geometría o dificultad se refiere. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, calcular parámetros en una dimensión extra requiere tiempo, que es justo lo que impide que este tipo de simulaciones sean más utilizadas. A pesar de la tecnología de la que se dispone actualmente estos cálculos son muy pesados para ordenadores estándar, pudiendo llegar a durar días e incluso semanas. Además, estos cálculos generan un gran volumen de datos que hay que tener en cuenta a la hora de montar los equipos necesarios.

Aun así, la tecnología para conseguir disminuir estos tiempos y para almacenar más cantidad de información ya existe y cada vez es más asequible, por tanto, la simulación en 3D es una buena apuesta contra la experimentación en torno.

8. Método de Elementos Finitos

Para analizar el comportamiento de un material en procesos de mecanizado pueden utilizarse [22] métodos empíricos, numéricos y analíticos.

- 1) Los métodos empíricos consisten en ensayos experimentales sobre la pieza real, lo que supone un gran costo de tiempo y dinero.
- 2) Los métodos analíticos son aquellos que hacen uso de expresiones de las fuerzas que aparecen a lo largo del proceso y también emplean criterios de rotura.
- 3) Los métodos numéricos utilizan programas de simulación basados en el método de los elementos finitos. Esta es la técnica usada para la consecución del proyecto.

Se discretiza el problema en el espacio y en el tiempo y se simula la operación. Para realizar este tipo de método es necesario disponer de modelos que se asemejen lo máximo posible a la realidad, así como la ecuación constitutiva adecuada.

8.1 Pasos seguidos para realizar el proyecto

Para este proyecto, el método de elementos finitos se usará mediante el programa Abaqus, que discretiza de manera continua el problema. Los pasos seguidos han sido los siguientes:

- 1) Lo primero que se hace es modelar el sólido que queremos estudiar.
- 2) Sobre este sólido inicial se imponen las condiciones de contorno. Estas definen la manera en la que la pieza estará sujeta, impidiendo también que se deforme la pieza en las regiones donde se encuentran los encastres. Esto se hace para definir de la mejor manera posible la acción que lleva a cabo el torno a la hora de mecanizar y la sujeción de la pieza. La Figura 8.1 muestra las condiciones de contorno que se imponen a la pieza y la herramienta:

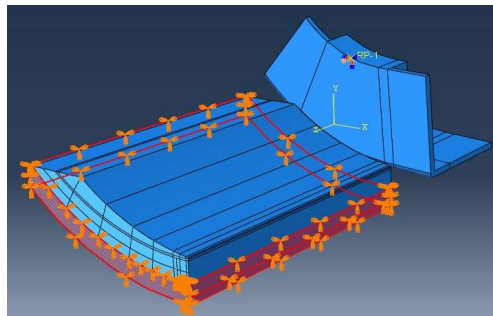


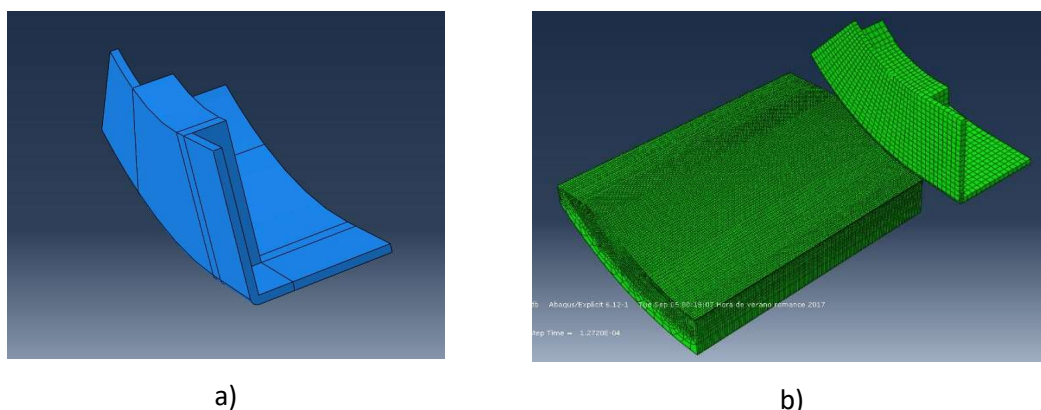
Figura 8.1: Esquema de las condiciones de contorno del ensayo

- 3) Una vez hecho esto se divide en un número de partes finitas o elementos. Cada uno de estos elementos está formado por ocho nodos, los cuales comparten con los elementos adyacentes. Es lo que se conoce como mallado y define el número de grados de libertad. Los elementos son del tipo C3D8T, lo que quiere decir que son elementos con ocho nodos y que cuentan con el grado de libertad de la temperatura.
- 4) Después de realizar todas las modificaciones oportunas en el modelo, se crea la tarea y se escribe el fichero .inp, el cual nos da directamente Abaqus. En este fichero se escriben las variables que queremos obtener del programa y el criterio de eliminación del material.
- 5) El archivo se guarda y se abre con el módulo *Job* de Abaqus, en el cual seleccionamos la memoria RAM que queremos asignar al proyecto y, en caso de que se pueda, asignar más núcleos y/o una tarjeta gráfica para acelerar el proceso.

- 6) Finalmente, se elige el directorio de salida y se lanza. Los cálculos generan un volumen de información bastante considerable, por lo que es bueno elegir una dirección en la que haya espacio más que de sobra.

Los procesos que lleva a cabo el programa consisten en tomar valores de desplazamiento de los nodos consecuencia de la aplicación de fuerzas. Con estos valores y aplicando las ecuaciones correctas se obtienen los parámetros que se buscaban, esto es, las fuerzas de corte y las tensiones que se producen.

Para detallar un poco más, usamos Abaqus/*Explicit*, versión 6.12, cuya funcionalidad reside en su capacidad para hacer cálculos sobre cargas dinámicas, en este caso un mecanizado. Así mismo, Abaqus dispone de Abaqus/*Implicit*, cuyo uso se limita a las cargas estáticas. Este último método no nos vale debido a que nuestra carga se encuentra en movimiento. En la Figura 8.2 pueden verse los modelos usados para el proyecto:



a)

b)

Figura 8.2: Modelos de la herramienta a) y de pieza y herramienta b)

8.1.1 Sobre el método y los tiempos de cálculo

Este método, surgido casi a la par que la era informática, nos brinda gran cantidad de información acerca del comportamiento de elementos sometidos a cargas y, además, es menos costoso que los ensayos sobre modelos reales. Si a estos le sumamos que cada día la capacidad de cálculo es mayor, así como su velocidad, podemos llegar a la conclusión de que la simulación numérica es, pero sobre todo será, una herramienta muy importante para este tipo de tareas.

Hablando de tiempos de cálculo y velocidad, y en concreto para este programa, Abaqus permite asignar más o menos recursos (memoria RAM) al proceso según el tamaño del cálculo. También es posible realizar procesos en paralelo, esto es, los procesadores generalmente, y más con los

años, constan de varios núcleos que a su vez están formados un par de hilos por núcleo. Cada uno de estos hilos puede realizar una “tarea”, por llamarlo de alguna forma. Bien pues, el cálculo en paralelo se trata de una forma de computar muchas instrucciones que se ejecutan de manera simultánea, apoyándose en el principio de que un problema grande puede descomponerse en varios más pequeños y estos se resuelven a la vez (en paralelo). Por tanto, el coste en tiempo de la simulación se reduce considerablemente. Hay que añadir que, con los avances en la tecnología en estos campos, se han ido implementado nuevos componentes para acelerar aún más el cálculo, como son los ordenadores con multiprocesadores o, sin ir más lejos, las tarjetas gráficas (GPU). Estas últimas ofrecen una aceleración y una precisión realmente impresionante, sobre todo si están diseñadas para este fin.

En relación a esto, hay que añadir que la malla será un factor decisivo a la hora de disminuir el tiempo de cálculo. Una malla más pequeña, con más nodos y los elementos, requerirá un tiempo considerablemente mayor que una malla más grande, con menos nodos y elementos. Esto es debido a que los cálculos nos dan la información que aparece en cada nodo, por tanto, cuantos más nodos haya, más tardará la acción. Pero hay que tener en cuenta que, aunque aumente el tiempo, también lo hará la precisión de cálculo, esto es, se realizan acción de cálculo en muchas más zonas, dándonos un conocimiento mucho más preciso de lo que ocurre durante el acabado.

9. Modelo

Abaqus/*Explicit* cuenta con un algoritmo explícito para modelizar problemas termo-mecánicos. Los elementos fundamentales en este problema son una herramienta, la cual se considera un cuerpo rígido y no se deforma, y la pieza, compuesto por el material que se deforma y del cual se arrancan las virutas y se da forma. Esta pieza se compone de una capa que se elimina (layer) para dar lugar a la creación de viruta, proveniente de los elementos deformados en exceso, de un chip, que sería la capa que pasa a ser la viruta, y la base, que es el resto de la pieza, donde se establecen las condiciones de contorno y se apoyan las otras dos capas como puede observarse en la Figura 9.1:

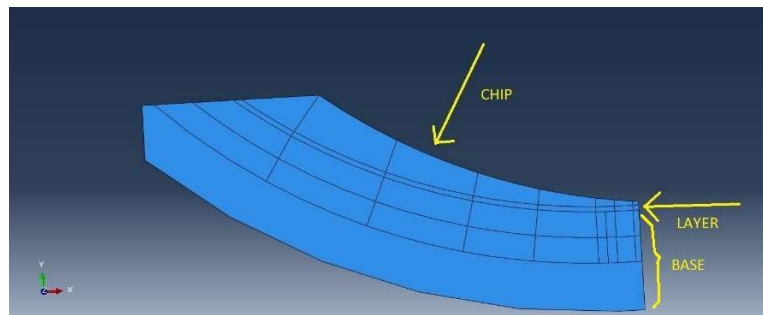


Figura 9.1: Esquema de las partes de la pieza (Chip, Layer y Base)

La información del modelo se escribe en un formato .inp, que se crea una vez acabado el modelo. Este archivo se modifica para poder introducir la orden que genera el fallo para que se elimine el material que se encuentra entre la capa que arrancamos y la que queremos conservar, el producto. Así mismo, se modifican los parámetros de salida.

Cabe destacar que la pieza a mecanizar fue modelada por mí, en base a un modelo facilitado por mi tutor, y la herramienta fue exportada de dicho modelo.

9.1 Geometría del modelo

La geometría que se usa en el modelo se puede ver en la Figura 9.2. La herramienta ha sido facilitada por el tutor del trabajo de fin de grado y la pieza a mecanizar formaba parte del proyecto, por tanto, ha sido modelizada por mí.

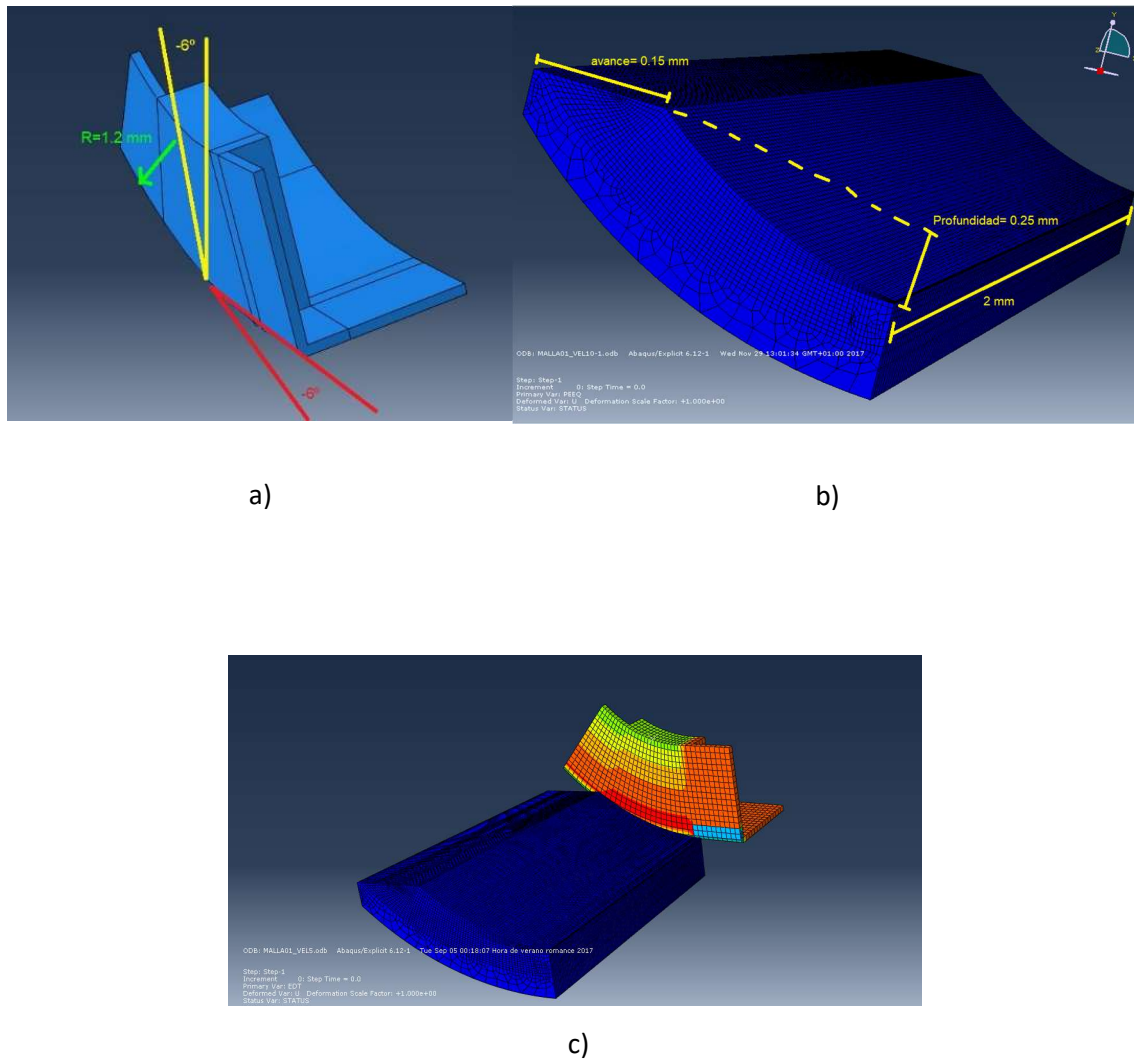


Figura 9.2: Modelo desarrollado para el ensayo: herramienta a), pieza a mecanizar b) y disposición de pieza y herramienta durante la simulación c).

10. Material

El iniconel 718 [23] es un material de níquel-cromo muy resistente a la corrosión, utilizado en un rango de temperaturas que oscila entre -217°C hasta 704°C . Esta aleación es conocida por su facilidad para ser fabricada, aunque la pieza que deseemos este compuesta de partes complejas, y pasado un tiempo se endurece. Sus características ante acciones de soldado son inmejorables, sobre todo la resistencia a romperse en el proceso de postsoldado. A parte de la facilidad de fabricación, posee una buena tensión, carga de rotura y fatiga, y esto ha influido de manera muy positiva a la expansión del uso del iniconel en aplicaciones industriales, tales como su uso en componentes para cohetes espaciales, recubrimiento para piezas de aeronaves o motores de turbina de gas. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones y su baja conductividad térmica

hacen que sea de difícil maquinabilidad. Para realizar una simulación de manera correcta es necesario definir el material para que las condiciones sean lo más parecidas posibles a como sucedería en el laboratorio.

Es un material que se comporta de manera termo-viscoplástica, es decir, que para caracterizar su comportamiento debemos tener en cuenta los valores de la temperatura y de la velocidad de deformación. En este caso, la temperatura que introducimos permanecerá constante, pero la temperatura que se desprende del proceso quedará reflejada en el modelo cuando obtengamos los resultados. La velocidad de deformación es otro parámetro que también introducimos desde el principio y que no varía a lo largo del proceso, pero sí varía en las diferentes simulaciones.

10.1 Propiedades

El Inconel 718 es una aleación y, como tal, tendrá una composición determinada. Dicho esto, en la siguiente tabla podrá observarse la composición química de la aleación usada en el estudio. Estos porcentajes no suelen variar mucho de una a otra aleación de Inconel y su cambio se debe al futuro uso que se le dé al material.

Hay que destacar que, al ser una aleación de níquel-cromo principalmente, estos elementos estarán en mayor proporción que el resto, siendo su peso porcentual muy superior al de los demás. La composición del Inconel 718 escogida será la que se muestra en la 10.1:

Tabla 10.1: Composición del Inconel 718 usado como material para este proyecto [24].

Elemento	Símbolo	Máximo %
Níquel	Ni	53.02
Cromo	Cr	18.49
Hierro	Fe	18.12
Niobio	Nb	5.40
Molibdeno	Mo	3.06
Titanio	Ti	0.96
Aluminio	Al	0.55
Cobalto	Co	0.10
Silicio	Si	0.06
Cobre	Cu	0.05
Manganeso	Mn	0.06
Carbono	C	0.03

10.1.1 Propiedades mecánicas

En la Tabla 10.2 nos encontramos con las propiedades mecánicas del Inconel 718 [25].

Tabla 10.2: Propiedades mecánicas del Inconel 718

Parámetro	G (GPa)	E (GPa)	ν	ρ (g/cm ³)	Re (MPa)
Valor	77.2	204.9	0.33	8.19	800-1360

10.1.2 Propiedades térmicas

A continuación, la Tabla 10.3 muestra las propiedades térmicas del Inconel 718 que se usaron en el modelo numérico desarrollado para el proyecto [25].

Tabla 10.3: Propiedades térmicas del Inconel 718

Parámetro	T _f (°C)	C _p (J/KgK) a 23°C	K (w/mK) a 23°C
Valor	1260-1336	435	11.2

10.2 Ley constitutiva de Johnson-Cook

La ecuación constitutiva [26] que se usa para simular el comportamiento del material es la de Johnson-Cook, que viene implementada en Abaqus. Esta ecuación reproduce el comportamiento de una pieza sujeta a grandes deformaciones, temperaturas y velocidades de deformación. Tiene en cuenta propiedades de elasticidad, plasticidad, viscosidad y propiedades térmicas, por eso este tipo de ecuaciones son llamadas ecuaciones termoviscoplasticas.

La tensión de fluencia definida por el modelo de Johnson-Cook es, por tanto:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right)$$

Donde:

$\dot{\varepsilon}$: velocidad de def. plástica efectiva.

ε : def. plástica efectiva.

$\dot{\varepsilon}_0$: velocidad de def. de referencia.

T_f : temperatura de fusión del material.

T_0 : temperatura ambiente.

A : límite elástico a T_0 .

B : factor de endurecimiento por deformación.

C : coef. Sensibilidad a la velocidad de deformación.

n : coef. Sensibilidad al endurecimiento por deformación.

m : coef. Sensibilidad a la temperatura.

- a) En esta expresión, el segundo grupo de corchetes representa el efecto de la viscosidad del material, dependiente de la velocidad de deformación plástica. Al aumentar esta, la tensión aumenta, dando lugar al endurecimiento del material.
- b) El último grupo corresponde al efecto debido a las condiciones térmicas del material. Al aumentar la temperatura la tensión disminuye, por lo que la pieza se ablanda debido al movimiento de dislocaciones en el interior de la misma.

Esta ley es una de las más empleadas en simulaciones numéricas (2D ó 3D) enfocadas a todo tipo de aplicaciones industriales; varios autores ido calibrando la ley y publicando nuevas conjugaciones de sus parámetros de endurecimiento, sensibilidad a la velocidad y temperatura. Los parámetros usados para este estudio son los propuestos por Tounsi y Attia [27] y pueden verse en la Tabla 10.4:

Tabla 10.4: Valores usados para los parámetros de la ley de Johnson-Cook

Parámetros ley de	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$ [s ⁻¹]
Johnson-Cook	790	610	0,23	0,011	3,28	0,01

10.3 Criterio de eliminación de material

Para esta simulación, el material es considerado un medio continuo y homogéneo; las propiedades mecánicas son idénticas en todos los puntos del material. La rotura aparece en los nodos que se ven más solicitados y se va propagando en función del criterio de rotura.

Esto se aplica tanto a la capa de material que se elimina (layer) como a la viruta que se desprende de la pieza (chip). (Pueden observarse ambas partes en la Figura 10.1)

La primera orden de eliminación de material por fallo por cizalladura es para el layer y la segunda para el chip (Shear Failure). Esta orden indica cuando el layer tiene que empezar a desprenderse de la base, ocurriendo dicha acción cuando se supera un valor de cizalladura crítico en los puntos que se están estudiando. Es un criterio de deformación plástica de eliminación de elementos que se escribe en el archivo .inp para que Abaqus opere en consecuencia. Cuando $\gamma > \gamma_{\text{crítico}}$ comienza la eliminación de elementos con el correspondiente

arranque de viruta. Esto es, para el layer, si $\gamma > 2.5$, comienza el arranque de la capa, y para el chip si $\gamma > 4$.

Hay que comentar que, como el layer es una capa muy pequeña en comparación con el resto de zonas, no tiene apenas repercusión en el cálculo de las fuerzas, ya que la eliminación de elementos en esta zona, al ser tan pequeña, es mínima, por lo que seguimos conservando prácticamente todos los elementos relevantes para el análisis. La Figura 10.1 muestra un esquema de las distintas capas y de la deformación equivalente máxima que cada una de ellas soporta:

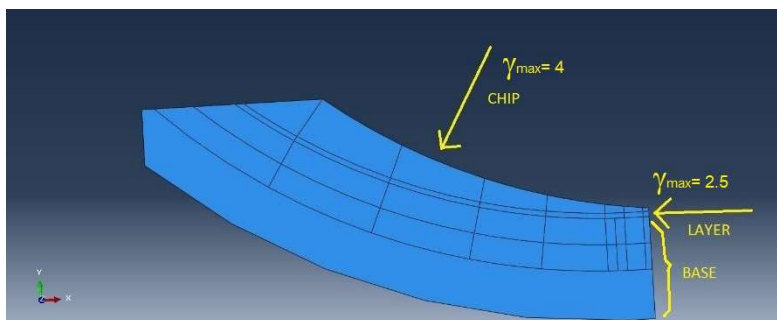


Figura 10.1: Esquema de las capas que componen la pieza. (Layer, Chip y Base)

La longitud a mecanizar siempre será la misma, pero el tiempo que tarda la herramienta en recorrer esta distancia dependerá de la velocidad de la herramienta, esto es, cuanto más rápida sea menos tiempo tardará en acabar el proceso y viceversa. Las simulaciones pueden considerarse fiables cuando los resultados obtenidos comienzan a ser repetitivos.

Estos cálculos conllevan un gasto de tiempo considerable, y más en simulaciones en 3D, por lo que una vez alcanzado un punto en el que los resultados son relativamente constantes puede pararse el proceso para ahorrar tiempo, así como espacio en el disco ya que estos volúmenes de datos suelen ser relativamente grandes.

11. Descripción de las simulaciones

Para realizar las simulaciones ha hecho falta analizar un gran volumen de información, así como llevar a cabo el proceso repetidas veces cambiando ciertos parámetros. Variar estos valores hace que definamos mejor la solución y lleguemos a conclusiones más precisas. No obstante, también ha hecho falta llevar a cabo esta acción debido a que el programa en ciertas ocasiones detecta deformaciones excesivas en algunos elementos que no puede calcular, dando error y parando el análisis por completo.

11.1 Archivo .CAE

Las modificaciones de parámetros se realizan en el archivo .CAE que genera Abaqus, es decir, en el modelo propiamente dicho. En este paso se puede modificar cualquier parámetro, no solo los relativos a este problema, como son por ejemplo las variables de salida que queremos obtener del proceso, es decir, los resultados. No obstante, en este caso solo se modifican estos dos valores:

- Velocidad de corte de la herramienta
- Mallado

11.2 Archivo .INP

En el archivo .inp se modifican, para este caso en particular, los resultados que queremos que imprima Abaqus y también el criterio que define el fallo del material. En la Figura 11.1 se ve una impresión de este tipo de archivo.

```

**
*Output, field, number interval=500
*Node Output
A, NT, RF, RFL, U, V
*Element Output, directions=YES
EDCDEN, EDT, ELEDEN, ELEN, ENER, ER, HFL, LE, PE, PEEQ, S, STATUS, TEMP
*Contact Output
CFORCE, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, time interval=6e-07
*Contact Output, cpset=Int-1
CFN1, CFN2, CFN3, CFNM, CFS1, CFS2, CFS3, CFSM, CFT1, CFT2, CFT3, CFTM
*End Step

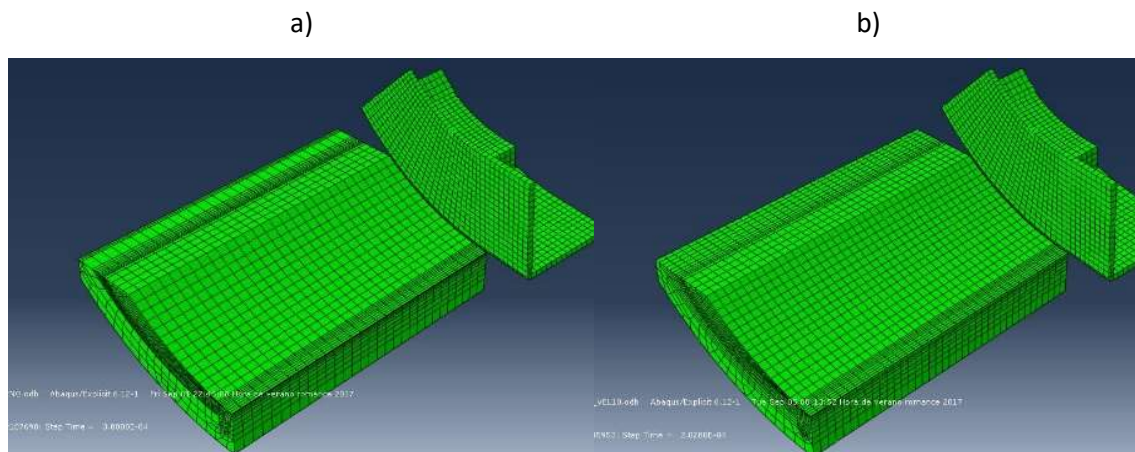
```

Figura 11.1: Impresión de resultados en el archivo .inp

11.3 Influencia del mallado en los resultados.

También decir que en función del mallado y de la velocidad, Abaqus ha calculado distorsiones excesivamente grandes y ha tenido que abortar el proceso debido a que serían soluciones totalmente inviables, obligando a cambiar alguno de estos dos valores para poder analizar el caso correctamente. Así mismo, y para este caso en concreto, no ha sido posible asignar más hilos, o procesamiento paralelo, para acelerar el proceso, ni tampoco utilizar la GPU para el mismo fin debido a que los algoritmos que usa para este tipo de análisis son explícitos.

Los mallados elegidos para este estudio se muestran en la Figura 11.2:



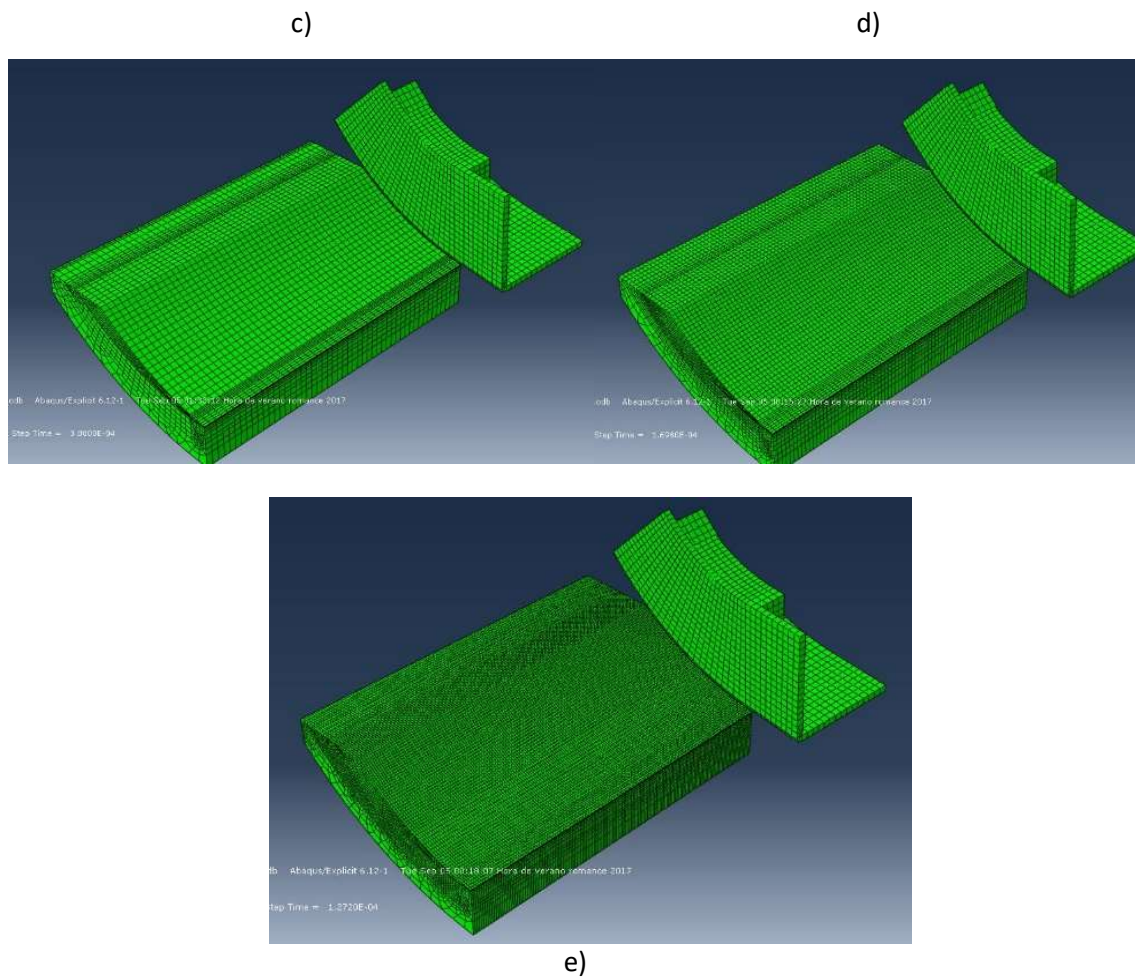


Figura 11.2: Mallados escogidos para este proyecto (en micras): a)50, b)40, c)30, d)20, e)10

12. Resultados

Una vez definido el mallado que se va a utilizar y la velocidad a la que actúa la herramienta, pueden comenzar los cálculos. Como ya se mencionó anteriormente, los cálculos pueden tomar un largo tiempo, pero finalmente se obtienen unos resultados parecidos para todas las mallas.

12.1 Evolución de las fuerzas en función del tiempo

En las Figuras 12.1, 12.2 y 12.3 puede verse cómo evolucionan las fuerzas de corte en función del tiempo en el mallado de 40 micras. He escogido este tamaño de malla porque era donde mejor se podía ver la evolución de dichas fuerzas, pero cualquier otro tamaño con su respectiva gráfica hubiese valido ya que todas tienen valores muy cercanos.

Es solo un ejemplo que muestra que, durante el proceso de acabado, ninguna de las fuerzas se mantiene constante. Estas van oscilando ligeramente a lo largo del tiempo hasta que acaba la operación.

Para realizar las comparaciones entre las diferentes mallas se ha calculado la fuerza media de cada una de las componentes que intervienen a la hora del corte. Todos los valores los imprime Abaqus/Explicit en una tabla con la que más tarde se trabaja en Excel.

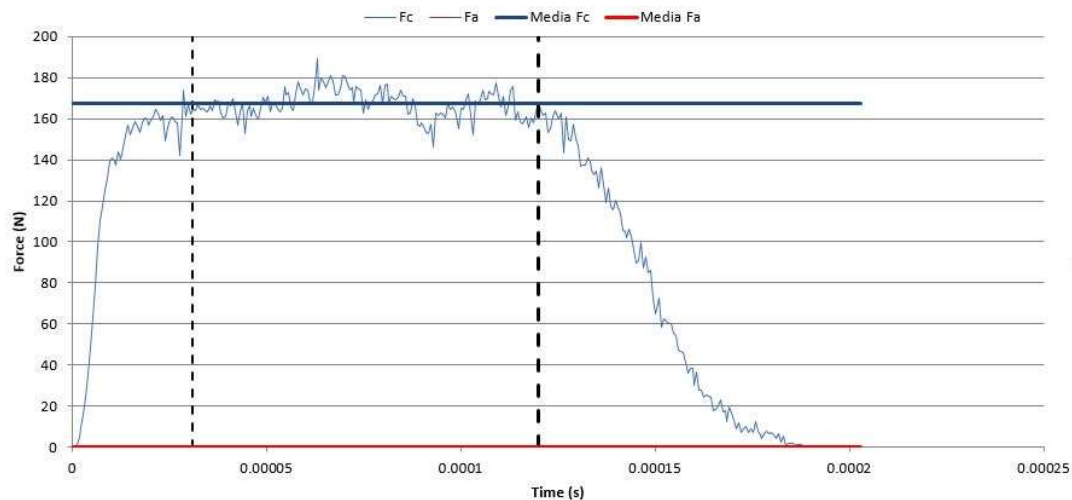


Figura 12.1: Fuerza de corte media que aparece en los ensayos.

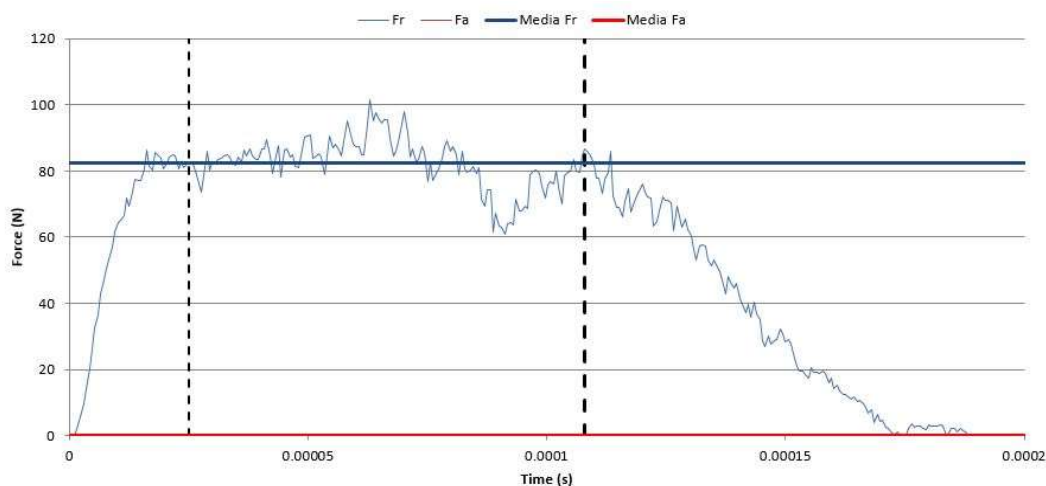


Figura 12.2: Fuerza radial media que aparece en los ensayos

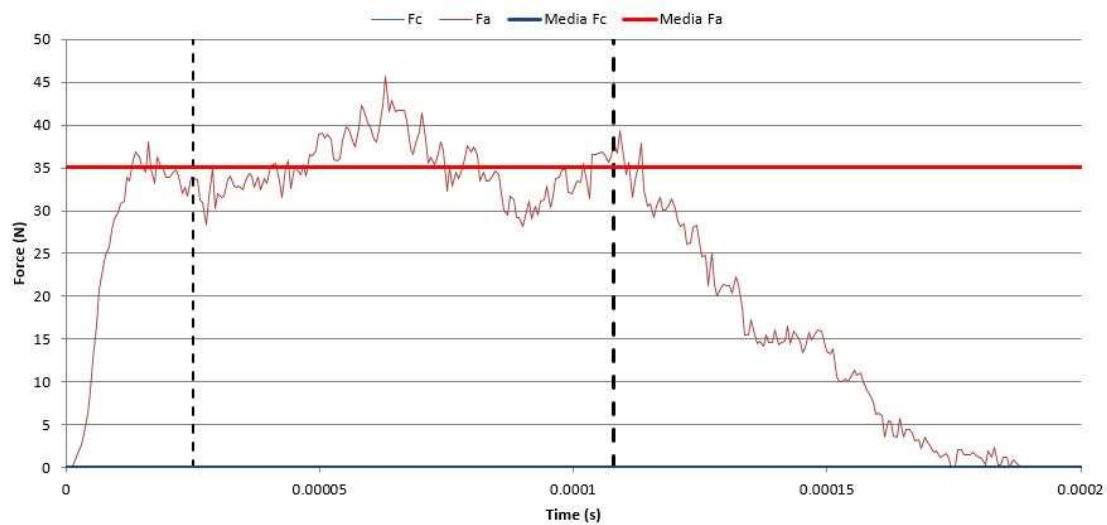


Figura 12.3: Fuerza axial media que aparece en los ensayos

12.2 Relación entre las fuerzas y el mallado

Como expuse en el párrafo anterior, no hay gran diferencia entre el tamaño de malla escogido si hablamos de fuerzas de corte, esto puede verse en las siguientes gráficas, donde se muestran los valores medios obtenidos en función del mallado. Se observa que, a pesar de haber variado tanto el número de elementos como la velocidad, las fuerzas no difieren unas de otras más que en unos cuantos Newtons. Por tanto, se llega a la conclusión de que podríamos usar cualquier malla para este estudio en concreto, ya que las fuerzas que obtenemos están en un rango de valores relativamente pequeño. La malla de 50 micras, como se verá más adelante, es perfectamente válida para obtener las cargas que aparecen en el corte porque puede definirlas con la misma precisión que la de 10 micras, pero en mucho menos tiempo.

No obstante, hay que tener en cuenta que la malla más pequeña será la que brinde los valores más exactos, pero esto ocurrirá a nivel local, esto es, si lo que buscamos es, por ejemplo, la temperatura, la deformación, la velocidad de deformación o la tensión equivalente, debido a que cuenta con más puntos donde recabar información. Si, por el contrario, buscamos valores globales, como en este caso las fuerzas de corte, el tamaño de malla no importará tanto, como puede comprobarse en los resultados obtenidos. También decir que el mallado más pequeño será el que más tiempo consuma precisamente por el número de nodos con los que cuenta y en los que tiene que realizar cálculos.

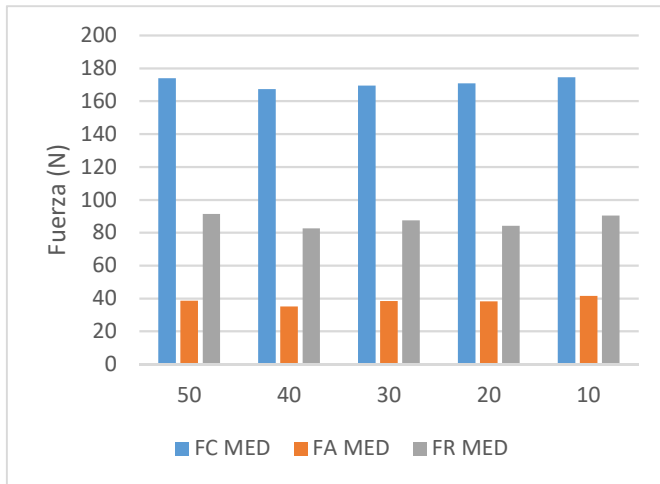
Este tipo de programas ayudan a comprender tanto el comportamiento de la pieza como de la herramienta de una manera muy precisa antes de empezar a trabajar con el material.

Así mismo, es necesario realizar ensayos prácticos para comprobar que los resultados son correctos y fiables, pero este método reduce significativamente el número de experimentos que debemos realizar para definir correctamente los parámetros de corte del material, en este caso Inconel 718.

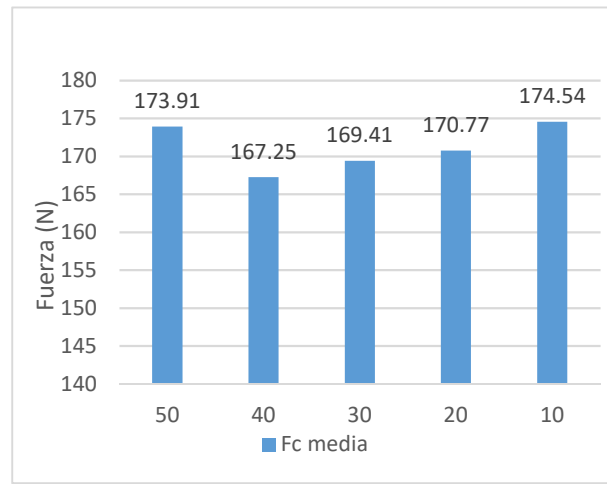
Como puede verse en la siguiente tabla, la influencia de la malla es mínima en cuanto a la obtención de resultados, ya que los valores de las fuerzas buscadas no difieren mucho entre ellos. Así mismo, puede verse que hay dos velocidades, esto es debido a que, para un ordenador estándar, los cálculos llegan a hacerse muy largos y costosos en cuanto a tiempo se refiere, por lo que se aumentó la velocidad en las mallas de 20 y 40 micras. Al obtener los resultados de estas dos mallas y compararlas con las mallas cuya velocidad es de 5 m/s puede observarse que estos son muy similares, la diferencia máxima entre las fuerzas es de un 4.18%, por lo que se llega a la conclusión de que ni el mallado ni la velocidad de corte tienen una repercusión excesiva en los valores de las fuerzas que aparecen durante el proceso para este rango de velocidades. Esto indica que la malla de 50 micras es tan válida para predecir fuerzas como la de 10. En la Tabla 12.1 se ven los valores que toman las fuerzas y en la Figura 12.4 pueden verse estos valores en forma de gráficas:

Tabla 12.1: Estudio de la variación de las fuerzas en función de la velocidad y del mallado

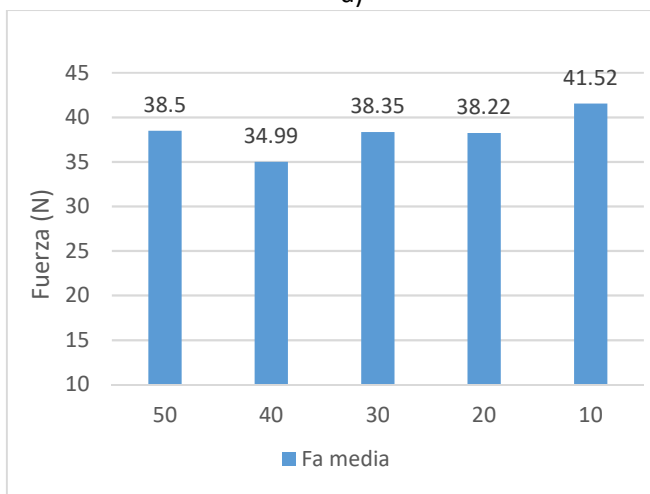
V [m/s]	MALLA [μm]	Fc [N]	Fa [N]	Fr [N]
10	40	167.25	34.99	82.6
10	20	170.77	38.22	84.18
5	50	173.91	38.5	91.3
5	30	169.41	38.35	87.42
5	10	174.54	41.52	90.28



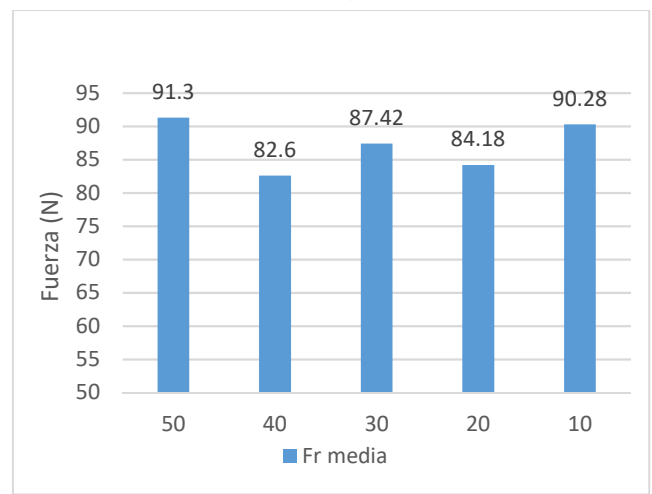
a)



b)



c)



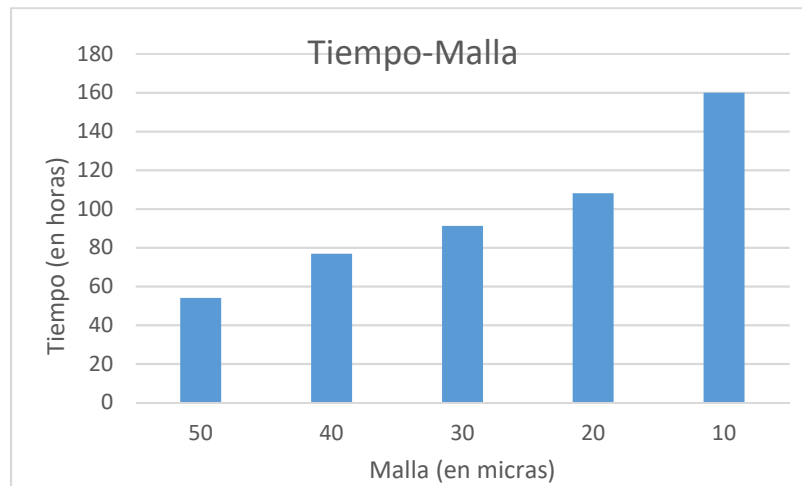
d)

Figura 12.4: Gráficas que muestran la variación de las fuerzas entre un mallado y otro. a) Todas las fuerzas en función del mallado, b) Fc en función del mallado, c) Fa en función del mallado y d) Fr en función del mallado.

12.2.1 Tiempo de cálculo en función del mallado

Como ya se ha mencionado anteriormente, la malla será un factor decisivo a la hora de reducir o aumentar los tiempos de cálculo y la precisión. En este caso nos centramos en los tiempos de cálculo, ya que es un factor a estudiar si se quiere sustituir la experimentación en torno por la simulación 3D numérica: cuanto menos tiempo tarde el proceso más procesos pueden hacerse en el mismo tiempo, contribuyendo a rentabilizar la inversión en equipos y finalmente, contribuyendo al beneficio.

En la Gráfica 12.1 pueden verse los tiempos de calculo que han tomado algunas de las simulaciones realizadas, todas ellas a una velocidad de 5 m/s:



Gráfica 12.1: Comparación del tiempo de cálculo en función del mallado a una velocidad de 5 m/s.

Estos tiempos de cálculo se consiguen sin utilizar *Mass Scaling*, una técnica que se explica más adelante y que ayuda a reducir los tiempos de cálculo de manera significativa.

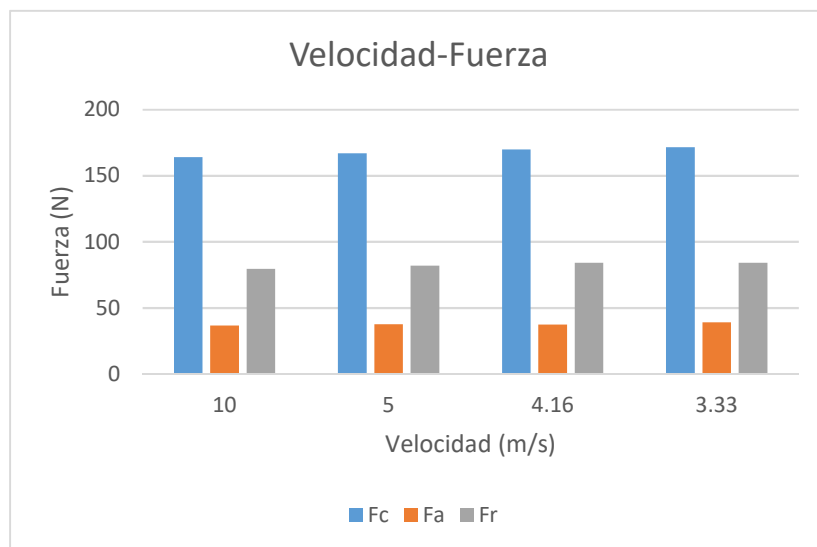
12.3 Estudio del efecto de la velocidad sobre las fuerzas de corte

Aun así, para cerciorarnos aún más, lo siguiente será comprobar con la malla más pequeña que estos valores a distintas velocidades no sufren una gran variación. Por tanto, para producir de manera eficiente, se necesitan herramientas que trabajen bien a altas velocidades y que no dañen el material debido a estas velocidades y sobrecalentamiento. Gracias a estas simulaciones pueden seleccionarse los elementos idóneos para producir una herramienta en concreto, así como definir los mejores parámetros para mecanizar la pieza sin que esta sufra daños.

Usando el modelo que incluye la malla de menor tamaño se repite lo observado con las otras mallas, esto es, las fuerzas que aparecen son muy similares a diferente velocidad. No obstante, se aprecia que, a medida que esta aumenta las fuerzas que intervienen en el proceso de mecanizado disminuyen, aunque sea de manera leve. A mayor velocidad se alcanza una mayor temperatura, lo que hace que el metal se ablande y sea más fácil de mecanizar. Esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de elegir la correcta velocidad de torneado si se quiere maximizar la vida tanto de la herramienta como de la pieza. En la Tabla 12.2 se muestran estos valores y en la Gráfica 12.2 su representación:

Tabla 12.2: Valores de las fuerzas medias en función de la velocidad para un mallado de 10 micras con coeficiente de rozamiento 0.5

VEL (m/s)	Fc (N)	Fa (N)	Fr (N)
10	163.94	36.72	79.48
5	166.91	37.71	81.92
4.16	169.91	37.4	84.1
3.33	171.62	39.05	84.2

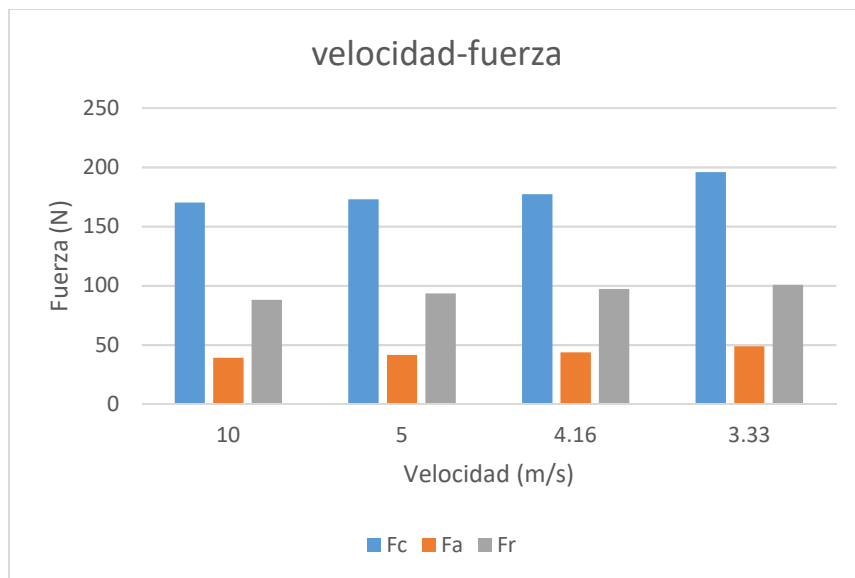


Gráfica 12.2: Representación de los valores de la tabla 9.1

Estas simulaciones han sido realizadas todas con un coeficiente de rozamiento teórico de valor 0.5, pero, de manera experimental, este parámetro tomará otro valor que estará en torno a 0.8, por tanto, es el valor elegido para las simulaciones con el coeficiente de rozamiento experimental. En la siguiente gráfica se muestra que, al igual que para 0.5, para valores distintos el resultado es el mismo: cuanto más velocidad, menores serán las fuerzas que estarán implicadas en el proceso. No obstante, hay que fijarse también en que tales fuerzas son mayores que las vistas en la primera tabla, y esto es debido a que todos los coeficientes experimentales son mayores que los teóricos, cuyo valor es el mismo y mencionado anteriormente, 0.5. La Tabla 12.3 muestra los valores que toman las fuerzas y la Gráfica 12.3 es su representación:

Tabla 12.3: Valores de las fuerzas medias en función de la velocidad para un mallado de 10 micras con coeficiente de rozamiento 0.8

VEL (m/s)	Fc (N)	Fa (N)	Fr (N)
10	170.17	39.13	87.99
5	173	41.44	93.32
4.16	177.14	43.59	97.32
3.33	195.97	48.69	100.66



Gráfica 12.3: Comparación de fuerzas con una malla de 10 micras en función de la velocidad con coeficiente de rozamiento de 0.8

12.4 Estudio del efecto del coeficiente de rozamiento sobre las fuerzas de corte.

Como se ha visto en el apartado anterior, el aumento de coeficiente de rozamiento (de 0.5 a 0.8) influye poco sobre las fuerzas de corte en el rango de velocidades en el que trabajamos, pero, aun así, su efecto se deja notar aumentando ligeramente sus valores. En la siguiente gráfica se hace una comparación de los valores de fuerzas que arrojan cada uno de los coeficientes. Puede verse que la diferencia es pequeña y que, por tanto, trabajando con un coeficiente de rozamiento estándar en las simulaciones (en este caso y en muchos otros se usa 0.5) llegamos a valores casi tan precisos y cercanos a lo real como con el proceso

experimental, esto es, con un coeficiente de rozamiento de valor 0.8. En la Figura 12.5 se ve de manera gráfica:

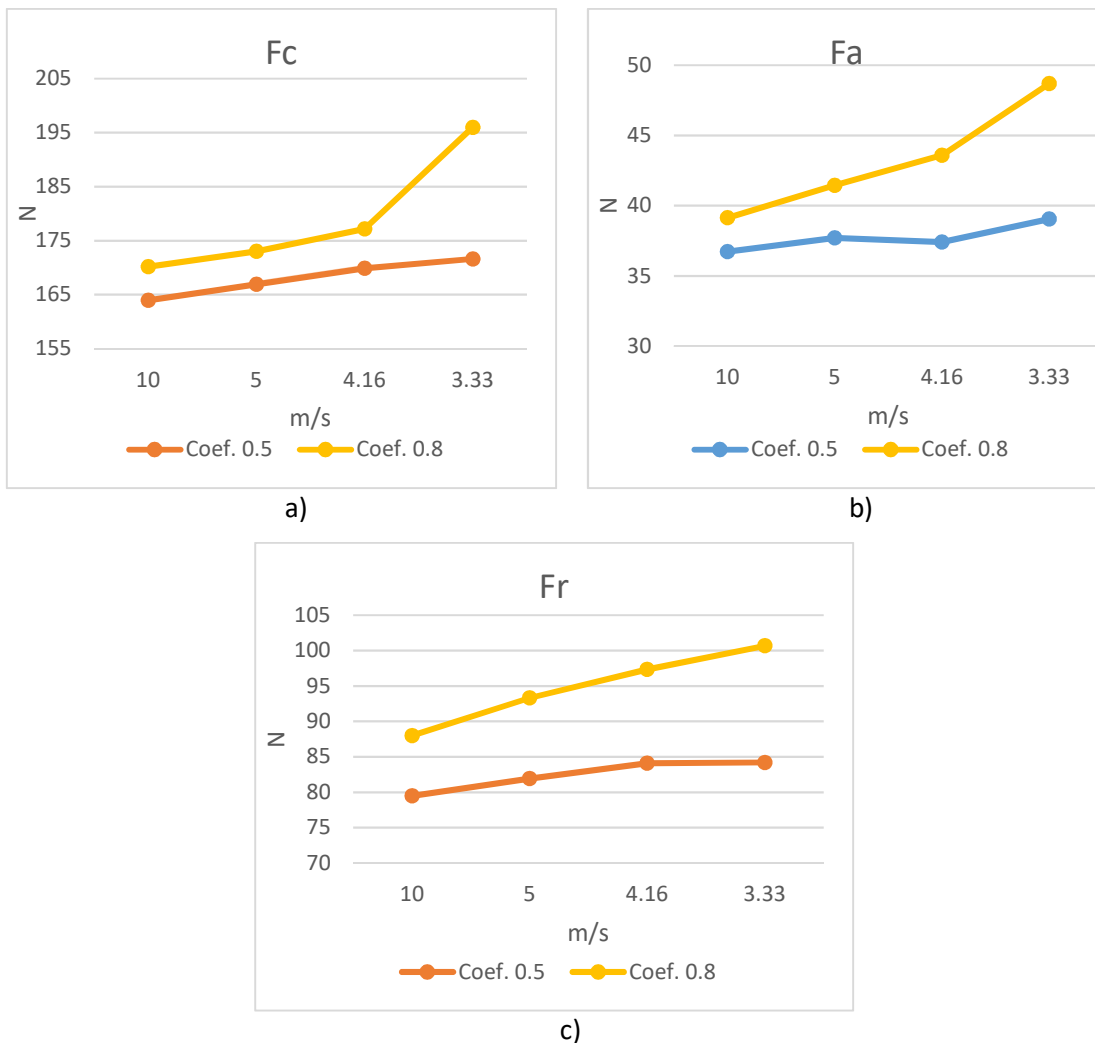
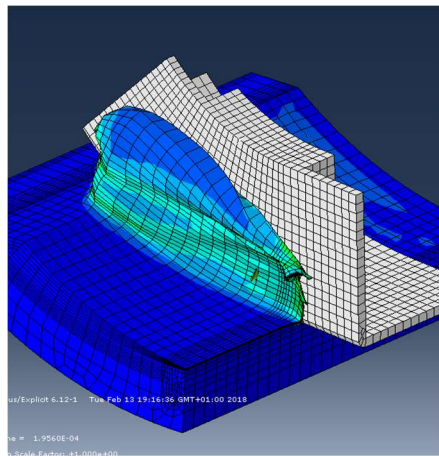


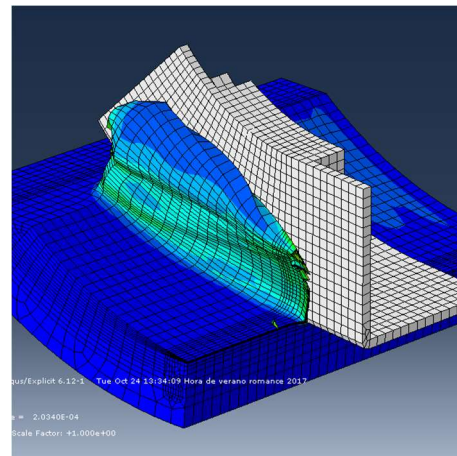
Figura 12.5: Gráficas que muestran la variación de: a) F_c con el coef. de rozamiento, b) F_a con el coef. de rozamiento y c) F_r con el coef. de rozamiento.

12.5 Estudio del efecto del mallado sobre la morfología de la viruta

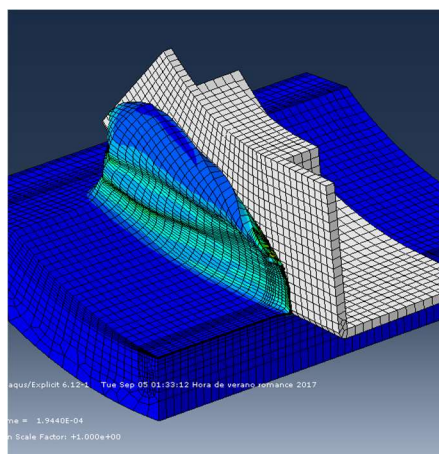
Así mismo, también se ha estudiado el efecto que produce el cambio de mallado sobre la morfología de la viruta. El resultado se muestra en la Figura 12.6. Pueden observarse a simple vista las diferencias que hay entre los mallados. La malla de 50 micras es la que produce más protuberancias en la forma de la viruta, haciéndola más escalonada e “imperfecta”. Por el contrario, a medida que disminuye el tamaño de malla se va viendo una viruta mucho más fina y continua, libre de tramos planos. Las únicas imperfecciones que muestra son las debidas a las propias fuerzas de corte que dan forma a la viruta.



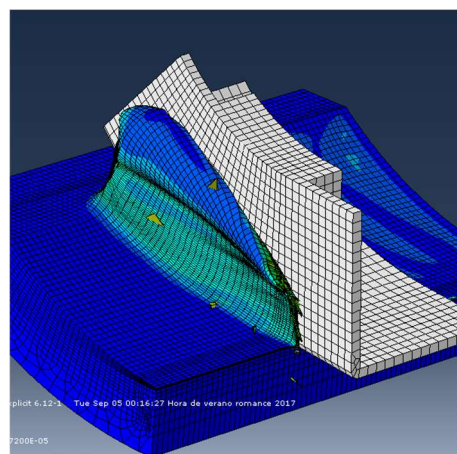
a)



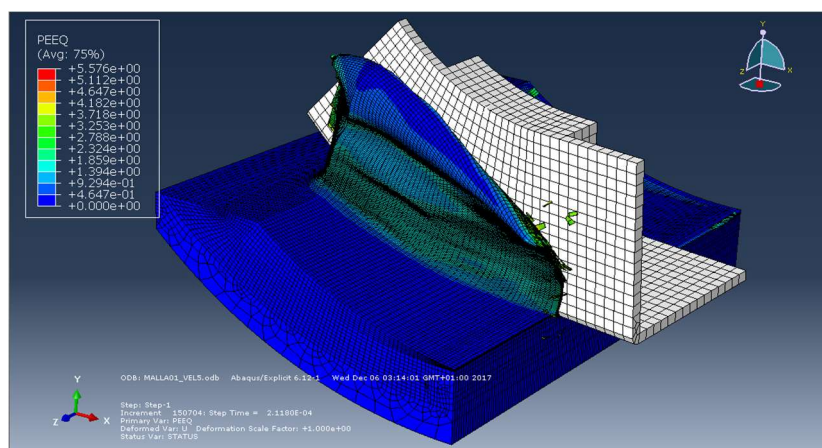
b)



c)



d)



e)

Figura 12.6: Morfología de la viruta en función del mallado (en micras): a)50, b)40, c)30, d)20 y e)10

Estos resultados corroboran lo que se dijo en el apartado 9.2: la malla de 50 micrómetros es capaz de predecir las fuerzas que aparecerán en el proceso de corte igual que la de 10 micras, siendo estas fuerzas un tipo de variable global. Sin embargo, al ser menor, la precisión que consigue la malla de 10 micras respecto a la de 50 a la hora de trabajar con variables locales como la temperatura o la tensión es muy superior.

Para nuestro estudio podrían usarse cualquiera de las dos, porque nos centramos en la fuerza, pero si tuviéramos que analizar la temperatura, por ejemplo, sería casi obligatorio utilizar el menor tamaño posible de malla.

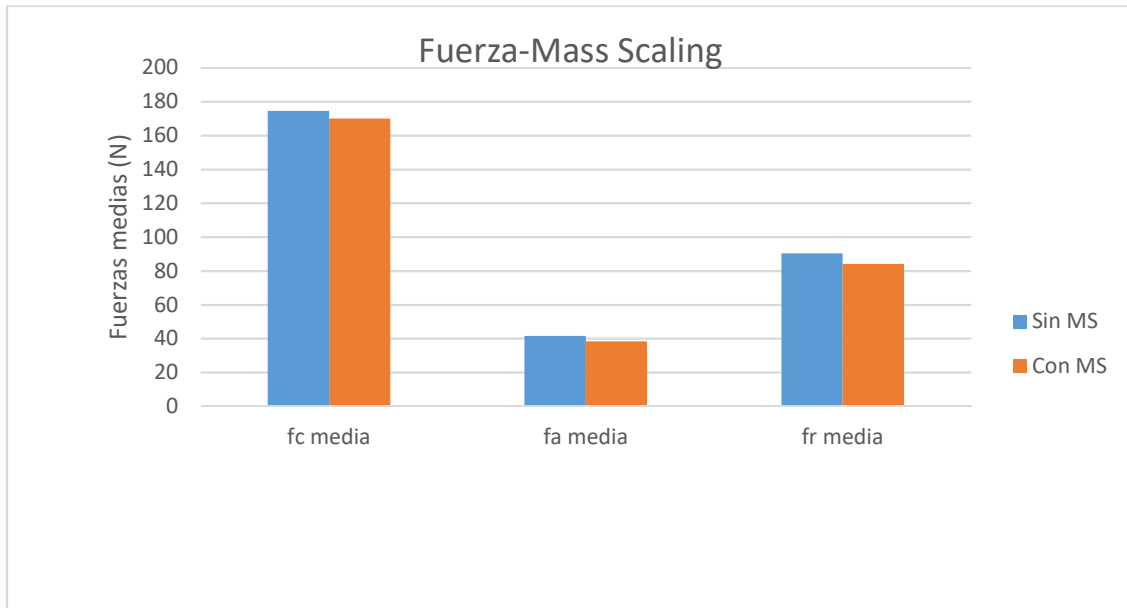
12.5.1 Mass Scaling

Si deseamos realizar simulaciones más complejas o de procesos que impliquen mayores piezas y herramientas y que los tiempos de cálculo sean menores tenemos dos opciones: o invertir más en un equipo más potente, o modificar ligeramente el archivo .inp.

El caso más sencillo es modificar el archivo .inp, que es lo he hecho en las ultimas simulaciones del proyecto debido a que, de la manera ordinaria, los tiempos de cálculo eran demasiado grandes como para ser viables.

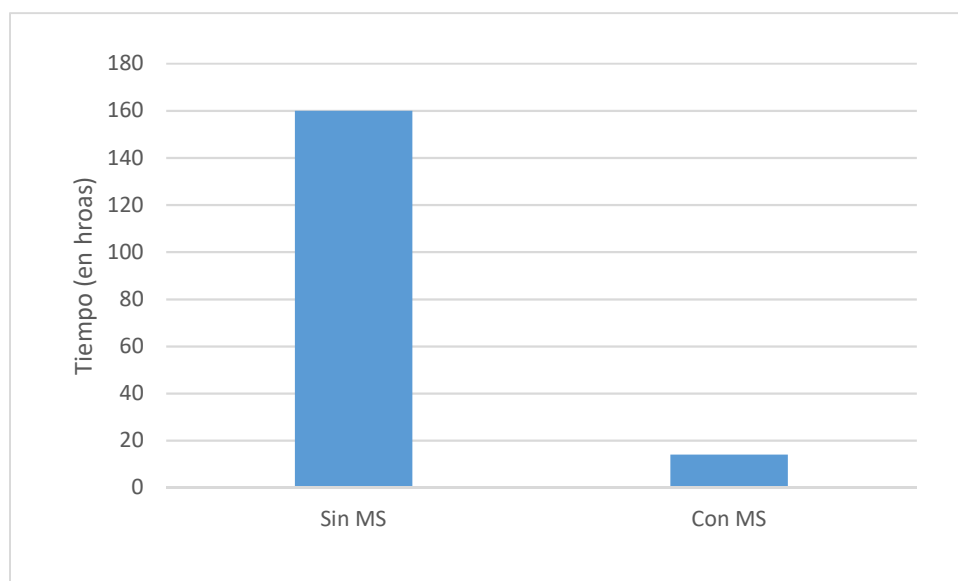
Esta modificación consiste en la incorporación de código al archivo .inp, un *mass-scaling (MS)*. Consiste en reducir virtualmente la densidad del material para así acelerar el proceso de cálculo.

A primera vista parece que, aplicando el *mass scaling* perdemos eficiencia en el resultado, pero no es así. Los resultados obtenidos sin *mass scaling* son muy parecidos a los obtenidos aplicando este método. Por tanto, se puede concluir en que es un método valido para reducir el tiempo de cálculo, así como un método igual de preciso a la hora de obtener resultados para operaciones de cargas dinámicas. Podemos utilizar perfectamente estos valores debido a que lo que buscamos es acotar unos límites aceptables para los mismos y no su valor preciso. Puede observarse en la Gráfica 12.4 que los resultados varían muy poco, siendo los resultados del *mass scaling* algo menores que los resultados que arroja la manera tradicional, pero aun así totalmente válidos.



Gráfica 12.4: Comparación de las fuerzas medias con y sin el uso del Mass Scaling a una velocidad de 5m/s y un mallado de 10 micrómetros.

Esta grafica se ha construido gracias a la simulación del proceso con la malla de 10 micras a una velocidad de 5 m/s, con y sin *mass scaling*. Se ha efectuado este estudio para comprobar que, tanto siguiendo un método como otro, los resultados son muy similares, difiriendo casi únicamente en los tiempos de cálculo, los cuales son mucho menores si usamos el *mass scaling*. En la Gráfica 12.5 se puede comparar la duración de ambos procesos.



Gráfica 12.5: Comparación del tiempo de cálculo en función del uso del Mass Scaling de la malla de 10 micras a una velocidad de 3.33 m/s

13. Estudio de variables locales en función de la velocidad

La tensión plástica equivalente, nos da una idea del estado tensional al que estará sometido nuestro sólido a la hora del corte. Tensiones superiores a esta hacen que el material se rompa. Puede observarse en la Figura 13.1 que, a medida que aumenta la velocidad, también es más intensa la localización de las deformaciones que tenemos. Este efecto de concentración de la deformación puede llegar a romper la viruta, pasando a ser de viruta continua a discontinua.

El aumento de la velocidad también hace que aumente la temperatura, por tanto, el material será más blando y fácilmente cizallable que al principio, lo que conlleva a una disminución de la tensión plástica equivalente; es más fácil romper el material.

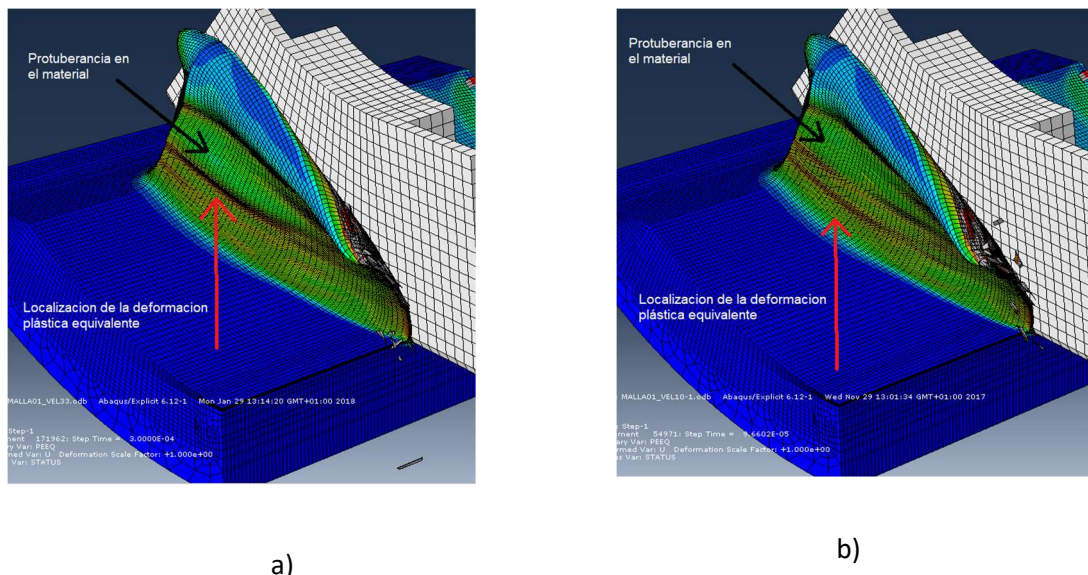


Figura 13.1: Tensión plástica equivalente que aparece en el mallado de 10 micras a distintas velocidades (en m/s): a)3.33 y b)10

De estos resultados puede extraerse también que la velocidad no es un factor relevante si hablamos de la morfología de la viruta. Si nos fijamos, da igual la velocidad a la que la herramienta recorre la pieza, la viruta siempre tiene una forma muy parecida y continua. Puede apreciarse también que, en alguna zona, hay trozos de viruta que se han desprendido como consecuencia de las fuerzas que aparecen.

La malla de 10 micras permite estudiar perfectamente la intensidad de la deformación plástica equivalente. Al contrario de la de 50 micras, la de 10 es mucho más precisa y nos da valores

muchos más exactos en muchos más puntos, por lo que se puede definir de manera muy acertada el estado tensional de la pieza, en este caso.

14. Discusión sobre los resultados obtenidos

Este proyecto concluye con la observación de los resultados anteriores. Puede verse que, para la obtención de variables globales, como son las fuerzas de corte que aparecen con la pasada de la herramienta, tanto para la malla de 10 μm como para la de 50 μm , y para las intermedias, son prácticamente iguales. Los valores son muy cercanos y de ello puede extraerse que cualquiera de las mallas es perfectamente válida para determinar dichas fuerzas.

La diferencia radica en que, si queremos obtener las variables locales, como son la tensión plástica equivalente, la temperatura, la tensión o la deformación, la malla más grande será la menos precisa. La malla de 10 μm , en este caso, nos dará una información mucho más detallada y ajustada a lo que ocurre durante el proceso de acabado. Esto se debe a que la malla menor cuenta con un mayor número de puntos donde efectuar los cálculos, por tanto, dispondremos de más resultados a los que recurrir para determinar las condiciones óptimas de mecanizado.

Por tanto, en función nuestras necesidades, usaremos un tamaño de malla u otra. Si queremos variables globales y reducir el tiempo de cálculo podremos optar por la malla mayor, ya que nos dará valores muy parecidos a la malla menor, pero el proceso será mucho menos duradero. Si, por el contrario, necesitamos variables locales, la malla más pequeña es la idónea para ese fin, siempre y cuando el tiempo no sea una limitación.

No obstante, también hay que observar la diferencia que va habiendo entre una malla y otra según vamos reduciendo el tamaño. La malla de 50 micrómetros es menos fina, esto es, tiene un mayor número de protuberancias debido al tamaño de sus elementos. Si nos fijamos en la malla de 10 micras vemos que la viruta que aparece es mucho más gradual y menos irregular que la primera.

Finalmente, en la Tabla 14.1 se puede observar un resumen de las simulaciones realizadas para este proyecto. Aunque siempre se tiende a escoger el valor del extremo (50 micras o 10 micras), se han realizado tal número de simulaciones para demostrar que, para este rango de velocidades, cualquier mallado brinda resultados más que aceptables si se trata de valores de variables globales.

Tabla 14.1: Simulaciones realizadas.

Malla [μm]	μ	Velocidad [m/s]
50	0.5	10
50		5
40		10
40		5
30		5
20		10
20		5
10		10
10		5
10		4.16
10		3.33
10	0.8	10
10		5
10		4.16
10		3.33

15. Entorno socioeconómico

Como se ha ido viendo a lo largo de todo el proyecto, la simulación 3D se ha presentado como una alternativa al método de ensayo y error. Esto se debe principalmente al ahorro económico que supone utilizar programas de simulación.

Centrándonos en el software *Abaqus/Explicit* y en el proyecto presentado, es un software que trabaja con modelos de elementos finitos cuya finalidad es comprobar que, tanto experimentalmente como de manera teórica (usando el programa), los valores de las fuerzas que aparecen durante el proceso de acabado son prácticamente iguales. Por tanto, el método de simulación en 3D es un método perfectamente válido para predecir el desgaste, la fuerza... que aparecerán durante este o cualquier otro proceso de mecanizado.

Es una técnica que a nivel industrial permite un ahorro en costes enorme. Hace no demasiado tiempo, para establecer unos límites óptimos de los parámetros de corte se necesitaba realizar múltiples ensayos combinando todos los posibles valores que podían tomar dichos parámetros. Esta acción requiere mucho tiempo, así como de personal altamente cualificado y maquinaria pesada, como es un torno. Además, hay que contar con que estas máquinas necesitan lubricante para trabajar correctamente y también recambios continuos de las herramientas para cuando estas se desgastan o se rompen. Así mismo, el torno cuando mecaniza una pieza genera residuos que hay que tratar y eliminar de manera adecuada y eficiente. Todas estas necesidades hay que pagarlas, por lo que, en general, el ensayo de piezas para determinar todas estas características resulta poco asequible. Si tenemos en cuenta que solo hay ciertas empresas, las más grandes, que pueden permitirse este tipo de equipamiento, el método experimental queda fuera del alcance de muchos consumidores potenciales.

Bien pues, la simulación en 3 dimensiones mediante el método de elementos finitos se presenta como alternativa al proceso experimental. Esta técnica requiere de un programa al que, introduciéndole los parámetros adecuados, devuelve las soluciones correctas mientras que el operario puede seguir realizando otras tareas. Así mismo, una menor necesidad de personal. Este personal deberá saber cómo trabajar con el software disponible, en este caso *Abaqus/Explicit*, y poder solucionar cualquier error que surja. Seguirá habiendo una necesidad de personal cualificado, pero al necesitar menos, se produce ahorro en costes. Por último, la herramienta de trabajo es un ordenador, cuyo precio, por caro que sea, siempre será mucho más económico que el precio de la maquinaria de mecanizado, en este caso un torno.

Para concluir, estamos hablando de un ahorro en costes, pero no solo eso, sino que, además, también se produce un ahorro en espacio. Los equipos informáticos requieren de menos espacio para trabajar, así como de situaciones no tan específicas para un correcto funcionamiento (tomas de alta tensión, espacios concretos de trabajo, gases...). Esta característica, junto con la automatización del proceso, hace que la industria sea más eficiente y productiva.

Mencionar también el consumo eléctrico de las máquinas pesadas en comparación con lo que consume como máximo un ordenador. Un torno CNC, por ejemplo, consume unos 11 kW [28], por el contrario, un ordenador como mucho, contando con una fuente de alimentación de las más potentes, puede llegar a consumir unos 1.2 kW. Esto se traduce en un ahorro energético que repercute en un ahorro económico considerable. Es más, aunque hubiera varios equipos informáticos trabajando a la vez seguiría siendo menor el consumo eléctrico.

No obstante, la simulación 3D no puede predecir ciertas condiciones que sí aparecen en un entorno industrial, como son vibraciones de la máquina, un ambiente corrosivo, desgaste paulatino de la herramienta... pero permite asegurar unos límites más que aceptables para los parámetros que se estudian.

15.1 Presupuesto

Para obtener un presupuesto aproximado, me centraré en el actual proyecto y en todo lo necesario para llevarlo a cabo, así como en el tiempo de ejecución de dicho proyecto. A lo largo de este trabajo han ido surgiendo complicaciones relacionadas con el sistema operativo que han alargado su duración, llegando esta a ser de aproximadamente unos 10-11 meses, pero en condiciones normales este tiempo hubiese sido mucho menor. En la Tabla 15.1 puede verse el coste de este tiempo de trabajo:

Tabla 15.1: En esta tabla se muestra el tiempo invertido en el proyecto y el coste que supondría a la hora de realizar un proyecto de estas características.

Concepto	Tiempo (h)	Coste (€/h)	Coste total horas (€)
Documentación	15	10	150
Uso de Abaqus/Explicit	548	15	5480
Memoria	110	10	1100
Electricidad	673	0.10986€/kwh *	73.94
TOTAL			6803.94

La Tabla 15.2 muestra el tiempo de uso del equipo durante el proyecto y su consumo:

Tabla 15.2: Tabla donde puede verse el tiempo invertido con el equipo, su coste y consumo eléctrico.

Concepto	Tiempo de uso (h)	Coste del equipo (€)	Consumo eléctrico (w)	Coste eléctrico (€)
Ordenador	673	2000	850	73.94

*El precio del kWh es de 0.12925€/h [29], pero como nuestro equipo consume 850w/h, el gasto será de 0.10986€/h.

El coste total aproximado del proyecto se refleja en la Tabla 15.3:

Tabla 15.3: Coste total del proyecto, contando con el equipo, las horas de trabajo, el coste de la electricidad y el coste de la licencia del software usado.

	Equipo (€)	Licencia de Abaqus (€)	Costes del Proyecto (€)	Coste total (€)
Inversion	2000	3000	6803.94	11803.94

16. Equipo utilizado para realizar el proyecto

Para finalizar el proyecto, faltaría analizar el equipo que se ha usado para llevar a cabo las simulaciones. No está de más debido a que, para un uso particular, da igual si los tiempos de cálculo son más o menos elevados, pero para uso industrial los valores de este tiempo tienen que ser lo más bajo posible; esto se consigue con un equipo más potente.

El procesador utilizado para estos ensayos ha sido un Intel i7-7700k [30] a una frecuencia de 4.5 GHz. Este es el elemento más importante a la hora de realizar cálculos con Abaqus/*Explicit*. El programa nos permite asignar varios hilos al proceso, produciéndose así el cálculo en paralelo, explicado en apartados anteriores, y una reducción de tiempo considerable. Hay que tener en cuenta que, cuantos más núcleos estén disponibles, más rápido se calculará la simulación. Si bien esto no es del todo cierto, ya que hay un número crítico de núcleo a partir del cual el proceso no disminuye su duración, sino que tiende a aumentarla. Esto sucede porque, al tener tantos núcleos ocupados realizando tareas sencillas, a la hora de recomponer el problema en su totalidad se crea una especie de cuello de botella que ralentiza el proceso.

Este procesador cuenta con cuatro núcleos físicos pero ocho virtuales, es decir, dos hilos por cada núcleo del procesador. Para la malla de 10 micras no ha sido posible asignar más de un núcleo, ya que, a la hora de compilar, Abaqus imprimía un error en pantalla que impedía

continuar el proceso. Pero, en el resto de mallas, asigné 3 hilos del procesador para acelerar los cálculos, ya que el error anteriormente citado no aparecía. En este caso, con 3 hilos asignados a cada proceso, solo se han podido lanzar dos simulaciones, ocupando un total de 6 hilos del procesador y dejando dos hilos libres para realizar el resto de funciones que requiere el equipo. Al igual que pasa con las memorias RAM, como se verá más adelante, no es posible asignar el total de hilos a un proceso debido a que la CPU no sería capaz de mantener el resto de funciones operativas, por tanto, el equipo se congelaría o podría apagarse.

También se ha hablado de la memoria RAM (*Random Access Memory* o memoria de acceso aleatorio). El equipo de trabajo cuenta con un total de 24 gb de memoria RAM. Abaqus/*Explicit* nos pide la cantidad de memoria que queremos asignar a cada cálculo, esto es, se pueden lanzar varios archivos .inp a la vez para que, si tenemos que realizar varias simulaciones, el proceso sea más rápido. En este caso, a cada proceso se han asignado entre 4 y 5 Gb de memoria y se han lanzado un máximo de 3 simulaciones. Para explicarlo mejor, si cada simulación ocupa entre 4 y 5 Gb de memoria y tenemos 3 en curso, sumarán un total de 15 Gb, al alza. Si ocupamos toda la memoria RAM restante, el ordenador solo podrá dedicarse a trabajar con el programa, en el mejor de los casos. En el peor, lo más probable es que se quede congelado y no responda, hecho que conlleva a una pérdida del trabajo realizado hasta el momento. Por tanto, necesitamos memoria RAM libre para poder seguir usando el ordenador y también para que no se quede pillado.

Dicho esto, cuando la malla ha sido la más pequeña (malla 10 micras), solo he lanzado una simulación por vez, debido a que, al tener más puntos en los que realizar cálculos, tardará más y, además, la carga del procesador será mayor que con mallas más grandes. Al lanzar una cada vez, también he asignado algo más de memoria, llegando esta en algunos casos hasta 8 gb.

Otro elemento a tener en cuenta es la GPU (*Graphics Process Unit* o unidad de procesamiento de gráficos). Para este proyecto en particular no ha sido posible asignar cómputo mediante GPU debido a que las tarjetas gráficas convencionales tienen la opción para realizar cálculos explícitos desactivada por defecto y no es posible cambiar esta condición, ya que están pensadas para otro tipo de usos. A pesar de esto, este tipo de hardware sería perfectamente capaz de realizar dichos cálculos sino tuviese ese impedimento, y a una velocidad muy superior a como lo hacen las CPUs, todo gracias a la gran cantidad de núcleos de los que dispone. Para concretar, el equipo usado cuenta con una tarjeta gráfica de Nvidia, la Nvidia Gtx 1060 de 6 Gb, que cuenta con un total de 1280 núcleos CUDA [31]. La tecnología CUDA es un tipo de arquitectura pensada para obtener el máximo rendimiento al equipo, gracias a que se basa en el procesamiento en paralelo. Esto,

unido al gran número de núcleos que conforman una tarjeta gráfica, hace que sean infinitamente más rápidas que la CPU.

Habiendo dicho esto, hay que comentar también que, para empresas que opten por la simulación numérica, hay GPUs más potentes y pensadas única y exclusivamente para realizar cálculos en paralelo y trabajar con este tipo de proyectos. Estos dispositivos pueden ser adquiridos por cualquier persona, pero si no se le va a sacar partido o se le va a dar una función acorde con su función, no merecen la pena, ya que es hardware realmente costoso y que interesa rentabilizar. Me refiero a las gamas de GPU de Nvidia pensadas para todos estos fines (simulación numérica, renderizado, *deep learning*...), las gamas Quadro y Tesla. Con ellas el tiempo de cálculo se verá enormemente reducido y la precisión que tienen estos procesadores es absoluta, por tanto, es una buena elección si se quieren ensayar piezas mediante software. Por último, mencionar la última gama de GPUs de Nvidia, Nvidia Titan V, creada tanto para particulares, para darle un uso doméstico, como para empresas y procesos industriales, ya que tiene incluso más núcleos que las Tesla o las Quadro y, según qué modelos, más potencia de cálculo.

Al igual que cualquier máquina de mecanizado, es importante mantener una buena temperatura para el correcto funcionamiento del procesador. La refrigeración es una de las partes más críticas si queremos que la CPU opere durante largos periodos de trabajo de manera adecuada, de lo contrario, el proceso puede verse ralentizado o, si se produce un exceso de temperatura, todo el equipo se apagará perdiendo el progreso. En mi caso, la refrigeración utilizada es un sistema de refrigeración líquida, que mantiene la temperatura en unos niveles mucho más estables que el clásico sistema de refrigeración por aire. En mi experiencia, para procesos industriales recomendaría siempre el uso de una refrigeración líquida, debido a que, aunque sea algo más costoso, es una manera de evacuar el calor mucho más eficiente y estable, lo cual asegura un funcionamiento impecable del procesador.

Lo último a tener en cuenta, pero no por ello menos importante, es el almacenamiento disponible. Las simulaciones llevadas a cabo en este proyecto son bastante pesadas, entre 40 y 130 Gb cada una, según el tamaño de malla utilizado. Por tanto, si se quiere utilizar este método para obtener los parámetros de corte óptimos, se debe disponer de un sistema de almacenamiento con capacidad suficiente para poder realizar todas las pruebas. En mi caso, el equipo dispone de 1.5 Tb de memoria, quedando libres unos 650 Gb después de realizar todas las pruebas. Esto da una idea del espacio que pueden llegar a consumir estos programas realizando este tipo de tareas.

Como conclusión a este apartado, puedo decir, sin temor a equivocarme, que este tipo de tecnologías de cálculo se irán imponiendo en la industria, no sólo porque su precio es muy inferior al de las máquinas que son usadas para ensayos, lo cual ya es bastante atractivo, sino por su efectividad y cada vez mayor rapidez. Además, estos equipos no necesitan tanto espacio para trabajar, se trata de computadoras, por lo que en un mismo sitio pueden tenerse todos los equipos realizando simulaciones simultaneas para ahorra aún más en tiempo.

El consumo eléctrico que se necesita para hacer trabajar a los equipos informáticos será siempre menor que el que consumen los equipos de mecanizado, aunque estos trabajen durante más tiempo, por lo que, a largo plazo, su adquisición, aparte de rentabilizarse antes, permitirá un ahorro energético y económico.

Bibliografía

- [1] «Inconel,» *Mega Mex*, [En línea]. Available: <http://megamex.com>. [Último acceso: 25 07 2017].
- [2] «Herramientas de corte para torno,» *De Máquinas y Herramientas*, 03 17 2014. [En línea]. Available: <http://www.demaquinasyherramientas.com>. [Último acceso: 30 07 2017].
- [3] L. E. V. Lujan, «Diferentes tipos de acabado,» *Monografías*, [En línea]. Available: <http://www.monografias.com>. [Último acceso: 30 07 2017].
- [4] *Apuntes de la asignatura de Sistemas de Producción y Fabricación*, UC3M.
- [5] *Pasarlascanutas*, [En línea]. Available: <http://www.pasarlascanutas.com>. [Último acceso: 23 09 2017].
- [6] *Ferrovicmar*, [En línea]. Available: <http://www.ferrovicmar.com>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [7] *Terratec*, [En línea]. Available: <http://www.compostperu.com>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [8] *Sitenordeste*, 28 07 2017. [En línea]. Available: <http://www.sitenordeste.com/>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [9] *Metalmecánica*, [En línea]. Available: <http://www.metalmecanica.com>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [10] «Mecanizado por arranque de viruta,» *Instituto de Máquina Herramienta*, [En línea]. Available: <http://www.imh.eus/es>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [11] Pyrosis13, «Maquinas, Herramientas y CNC,» 09 09 2011. [En línea]. Available: <https://pyrosisproyect.wordpress.com>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [12] «Maquina herramienta y procesos de mecanizado,» *Tumblr.*, 07 12 2013. [En línea]. Available: <https://maquinaherramienta.tumblr.com/post/69256719794/proceso-de-torneado>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [13] *Ingeniería Mecafénix*, [En línea]. Available: <http://www.ingmecafenix.com>. [Último acceso: 03 09 2017].
- [14] *Direct Industry*, [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es>. [Último acceso: 05 09 2017].
- [15] *Taiwan Machinesource*, [En línea]. Available: <http://es.machinetools.net.tw/>. [Último acceso: 05 09 2017].

- [16] J. Zambonino, «Formación de viruta en procesos de maquinado CNC,» *SlideShare*, 19 08 2014. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net>. [Último acceso: 30 08 2017].
- [17] Danilovanegas64, «Viruta,» *Emaze*, 10 10 2016. [En línea]. Available: <http://www.emaze.com>. [Último acceso: 05 09 2017].
- [18] T. Pitkänen, «Herramientas de refrigeración dirigida a alta presión,» *RevistaTope*, [En línea]. Available: <http://www.revistatope.com>. [Último acceso: 05 09 2017].
- [19] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, México: Pearson Educación, 2002.
- [20] *Construcciones Metálicas La Reina*, 10 11 2011. [En línea]. Available: <http://construccionesmetalicaselr.blogspot.com.es>. [Último acceso: 14 09 2017].
- [21] H. P. Prado, «Herramientas de trabajo,» *SlidePlayer*, 2016. [En línea]. Available: <http://slideplayer.es>. [Último acceso: 16 09 2017].
- [22] *Apuntes de la asignatura de Elasticidad*, UC3M.
- [23] «Inconel 718,» *NiWire Industries Co. Ltd*, [En línea]. Available: <http://www.niwire.com>. [Último acceso: 28 07 2017].
- [24] V. Muñoz, J.L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M.H. Miguélez, «High speed machining of Nickel-based alloys (HRSA) with CBN tools».
- [25] «Inconel alloy 718 - Aleación resistente al calor,» *GoodFellow*, [En línea]. Available: <http://www.goodfellow.com>. [Último acceso: 30 08 2017].
- [26] F. Jafarian, M. Imaz Ciaran, D. Umbrello, P.J. Arrazola, L. Filice, H. Amirabadi, «Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes,» *International Journal of Mechanical Sciences*, pp. 110-121, 2014.
- [27] N. Tounsi, H. Attia, «Identification of Constitutive Law for Inconel 718 in Machining,» *HRC-CNRC, Report developed for SFTC. Deform 3D library (2007)*
- [28] «Torno CNC,» *Nakamura*, [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu>. [Último acceso: 30 01 2018].
- [29] «Precio del kWh en España 2017,» *Tarifagasluz*, 2017. [En línea]. Available: <https://tarifagasluz.com>. [Último acceso: 25 01 2018].
- [30] Intel, «Procesador Intel Core i7 7700k,» *Intel*, [En línea]. Available: <https://ark.intel.com>. [Último acceso: 25 01 2018].
- [31] NVidia Corporation, «¿Qué es CUDA?,» *NVidia*, [En línea]. Available: <http://www.nvidia.es>. [Último acceso: 30 01 2018].

